

CONCEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE ROLHÕES EM TÚNEIS HIDRÁULICOS SUBMETIDOS A ELEVADAS PRESSÕES

CATARINA CHAMINÉ MARTINS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Engenheiro Celso Martins de Lima

Coorientador: Engenheiro Carlos Esteves

JUNHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha Avó...

*“Pelo sonho é que vamos,
comovidos e mudos.
Chegamos? Não chegamos?
Haja ou não haja frutos,
pelo sonho é que vamos.
Basta a fé no que temos.
Basta a esperança naquilo
que talvez não teremos.
Basta que a alma demos,
com a mesma alegria,
ao que desconhecemos
e ao que é do dia a dia.
Chegamos? Não chegamos?
- Partimos. Vamos. Somos.”*

Sebastião da Gama

AGRADECIMENTOS

Ao longo deste semestre muitas foram as palavras de alento e incentivo demonstradas, daí que alguns agradecimentos devem ser feitos.

Desde já agradeço ao Professor Celso Lima pela forma como orientou esta tese e pela motivação que transmitiu quando abordava o tema. Também agradeço pela disponibilidade, empenho e dedicação que demonstrou ao longo deste percurso.

Ao Engenheiro Carlos Esteves, agradeço pela incansável paciência, pela enorme ajuda e disponibilidade demonstrada.

A todos os professores da área de Geotecnia da FEUP, agradeço o conhecimento transmitido ao longo deste ano.

Aos meus amigos e colegas que tornaram este último ano académico o melhor de sempre. Ficarão na memória momentos como os cafés no DEC ou os almoços animados na cafetaria.

Aos meus Pais, que sempre tiveram uma palavra de incentivo e motivação. A minha irmã e ao Guilherme que estão sempre prontos para me desencaminharem do trabalho contínuo que a dissertação exige.

RESUMO

No decorrer da construção de aproveitamentos hidroelétricos, é usual a utilização de túneis auxiliares que facilitam a construção de elementos chave do projeto. Exemplo desses túneis auxiliares, são os túneis de derivação provisória que fazem com que seja possível a construção a seco da barragem. No entanto, após a conclusão da obra é necessário efetuar a obstrução dos mesmos.

Assim, o nosso objeto de estudo será a estrutura que permite materializar essa obstrução, ou seja, o rolhão. Devido à sua elevada importância, para o bom funcionamento do aproveitamento hidroelétrico, este elemento carece de um adequado dimensionamento quer a nível estrutural como hidráulico. Deste modo, compilam-se informações teóricas sobre a estrutura e focam-se alguns aspetos essenciais de projeto.

Por outro lado, também se irá realizar uma abordagem mais prática do tema, através de casos de estudo aplicados a dois empreendimentos: o aproveitamento do Baixo Sabor e o reforço de potência de Venda Nova III. Pretendemos adquirir algum conhecimento prático sobre a estrutura, analisando o seu comportamento no que respeita às tensões instaladas no contacto com o maciço, aos deslocamentos e à influência de alguns parâmetros na modelação. Para isso recorreu-se ao *software* Phase² da Rocscience.

Após os casos de estudo, também se fará uma pequena abordagem sobre a aplicação de injeções neste tipo de estruturas. Apesar de à primeira vista esta técnica parecer pouco importante, a mesma é fundamental para o projeto de um rolhão, uma vez que está englobada na componente hidráulica do projeto, apresentando custos bastantes significativos.

PALAVRAS-CHAVE: Rolhão, Phase², Baixo Sabor, Venda Nova III, Dimensionamento.

ABSTRACT

During the construction of hydroelectric exploitations, it's usual to use auxiliary tunnels, which facilitate the construction of key elements of the project. Examples of these auxiliary tunnels are the provisional junction tunnel, which makes it possible to dry construction of the dam. However, after the conclusion of the work, it is necessary to make the obstruction of them.

Therefore, our object of study is the structure that allows materializing this obstruction, namely the plug. Because of their high importance for the proper functioning of hydroelectric exploitation, this element needs a proper design, both at structural and hydraulic. In this way, we intend to compile some theoretical information of the structure and focus on some essential aspects of the project.

On the other hand, we will also perform a more practical approach of the topic through two case study, applied two developments: the exploitation of Baixo Sabor and strengthening power of Venda Nova III. We intend to get some knowledge about the structure, analysing their behaviour in relation to stress installed in contact with the rock, the displacement and the influence of some parameters on the modelling. For this, we use the software Phase² of Rocscience.

After the case studies, a small approach was also held to the application of grouting in this type of structures. Although at first glance this technique seems unimportant, but is essential for the design of a plug as it is encompassed in the hydraulics of the project, with costs quite significant.

KEYWORDS: Plug, Phase², Baixo Sabor, Venda Nova III, Design.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE QUADROS	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xvii

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DA DISSERTAÇÃO	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	1
1.3. SOFTWARE UTILIZADO NA MODELAÇÃO	2
 2. ROLHÕES	 5
2.1. GENERALIDADES	5
2.2. TIPOS DE ROLHÕES	5
2.3. PARÂMETROS DE PROJETO	7
2.3.1. LOCALIZAÇÃO DO ROLHÃO NO MACIÇO	7
2.3.2. FORMA DO ROLHÃO	17
2.3.3. DIÂMETRO E COMPRIMENTO DO ROLHÃO	20
2.4. ASPETOS CONSTRUTIVOS	23
 3. BAIXO SABOR	 25
3.1. ENQUADRAMENTO	25
3.2. MODELAÇÃO	29
3.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO E DO BETÃO	29
3.2.2. TIPOS DE ANÁLISE	29
3.2.3. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS E CONDIÇÕES FRONTEIRA	30
3.2.4. ESTADO DE TENSÃO INICIAL E PRESSÃO APLICADA NO ROLHÃO	31
3.2.5. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	32
3.3. INTRODUÇÃO AO CASO DE ESTUDO	33

3.3.1. CASO DE ESTUDO 1.....	35
3.3.2. CASO DE ESTUDO 2.....	38
3.3.3. CASO DE ESTUDO 3.....	42
3.3.4. CASO DE ESTUDO 4.....	50
3.3.4.1. Cenário 1	51
3.3.4.2. Cenário 2	53
3.3.4.3. Cenário 3	55
3.3.4.4. Cenário 4	58
3.3.4.5. Conclusões gerais	60

4. VENDA NOVA III	63
4.1. ENQUADRAMENTO	63
4.1.1. PRIMEIRO REFORÇO DE POTÊNCIA – VENDA NOVA II/FRADES.....	64
4.1.2. SEGUNDO REFORÇO DE POTÊNCIA – VENDA NOVA III	66
4.2. MODELAÇÃO	73
4.2.1. LOCALIZAÇÃO DO ROLHÃO E CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO.....	73
4.2.2. GEOMETRIA DO ROLHÃO.....	76
4.2.3. CARACTERÍSTICAS DO BETÃO E DA BLINDAGEM	76
4.2.4. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS E CONDIÇÕES FRONTEIRA.....	77
4.2.5. ESTADO DE TENSÃO INICIAL E CARGA APLICADA NO ROLHÃO.....	78
4.2.6. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	79
4.3. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	80
4.4. ANÁLISE DE RESULTADOS 1	81
4.5. ANÁLISE DE RESULTADOS 2	83
4.6. ANÁLISE DE RESULTADOS 3	85
4.7. ANÁLISE DE RESULTADOS 4	87

5. INJEÇÕES EM ROLHÕES	91
5.1. GENERALIDADES	91
5.2. APLICAÇÃO DE INJEÇÕES EM ROLHÕES.....	92
5.3. O CASO DO BAIXO SABOR	93
5.4. O CASO DE VENDA NOVA III	95
5.4.1. ANTES DA BETONAGEM DO ROLHÃO	95

5.4.2. APÓS A BETONAGEM DO ROLHÃO	96
---	----

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
--------------------------------------	------------

BIBLIOGRAFIA.....	103
--------------------------	------------

ANEXOS	A.1
---------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 Rolhão em túneis paralelos.....	6
Fig.2.2 Rolhão entre túneis paralelos - Exemplo do reforço de potência de Alqueva (Corte) [3].....	6
Fig.2.3 Ábaco que relaciona o Índice Q com o tipo de suporte e a qualidade da rocha [5].	14
Fig.2.4 Determinação aproximada do valor do GSI [6].....	15
Fig.2.5 Rolhão retangular (betão armado).	17
Fig.2.6 Rolhão em arco (betão simples).	17
Fig.2.7 Forma do tipo 2.	18
Fig.2.8 Rolhão retangular.....	18
Fig.2.9 Rolhão de secção retangular que permite acesso a pessoas (utilização de blindagem dotada de porta estanque).	19
Fig.2.10 Rolhão de secção retangular que permite o acesso rodoviário e a equipamentos (utilização de blindagem dotada de porta estanque).	19
Fig.2.11 Carga hidrostática total.	20
Fig.2.12 Modelo idealizado por Garrett e Campbell Pitt [9].	22
Fig.2.13 Modelo para um rolhão com as faces inclinadas de um ângulo β [9].	22
Fig.3.1 Perfil Longitudinal do aproveitamento [12].....	25
Fig.3.2 Planta do escalão de montante [14].....	26
Fig.3.3 Antevisão do escalão de montante [11].	26
Fig.3.4 Planta do escalão de jusante [15].	27
Fig.3.5 Antevisão do escalão de jusante [11].	27
Fig.3.6 Caracterização geométrica do rolhão [16].	28
Fig.3.7 Materialização da interface [17].	29
Fig.3.8 Materialização da interface no Phase ²	30
Fig.3.9 Discretização da malha de elementos finitos.....	30
Fig.3.10 Condições fronteira.	31
Fig.3.11 Aplicação das cargas distribuídas.....	31
Fig.3.12 Tensão Normal.....	35
Fig.3.13 Tensão tangencial.....	36
Fig.3.14 Deslocamentos totais para diversos valores do módulo de deformabilidade (E) - Cenário 1.....	38
Fig.3.15 Gráfico dos deslocamentos para os diversos módulos de deformabilidade – Cenário 1.....	39
Fig.3.16 Zonas de plastificação para diferentes valores do módulo de deformabilidade (E) - Cenário 1.....	39

Fig.3.17 Deslocamentos totais para diferentes valores do módulo de deformabilidade (E) - Cenário 4.....	40
Fig.3.18 Gráfico dos deslocamentos - Cenário 4.....	40
Fig.3.19 Zonas de plastificação para diferentes valores do módulo de deformabilidade (E) - Cenário 4.....	41
Fig.3.20 Acréscimo da tensão principal máxima e pormenor da mesma - Cenário 2 com e sem gola.....	42
Fig.3.21 Acréscimo da tensão principal mínima e pormenor da mesma - Cenário 2 com e sem gola.....	43
Fig.3.22 Zona de plastificação e pormenor - Cenário 2 com e sem gola.	44
Fig.3.23 Acréscimo da tensão principal máxima e pormenor da mesma - Cenário 3 com e sem gola.....	45
Fig.3.24 Acréscimo da tensão principal mínima e pormenor da mesma - Cenário 3 com e sem gola.....	46
Fig.3.25 Zona de plastificação e pormenor - Cenário 3 com e sem gola.	47
Fig.3.26 Efeito da gola nas tensões normais e tangenciais.....	48
Fig.3.27 Pormenor do rolhão com a construção de um chanfre.....	49
Fig.3.28 Comparação do acréscimo da tensão principal máxima sem chanfre (esquerda) e com chanfre (direita).	49
Fig.3.29 Deslocamento totais para o caso axissimétrico – Cenário 1.	50
Fig.3.30 Deslocamento totais para o caso estado plano sem interface – Cenário 1.....	51
Fig.3.31 Deslocamento totais para o caso estado plano com interface – Cenário 1.....	51
Fig.3.32 Curvas dos deslocamentos totais.	52
Fig.3.33 Deslocamentos totais para o caso axissimétrico- Cenário2.	53
Fig.3.34 Deslocamentos totais para o caso estado plano sem interface - Cenário 2.....	53
Fig.3.35 Deslocamentos totais para o caso estado plano com interface - Cenário 2.....	54
Fig.3.36 Deslocamentos totais - Cenário 2.	55
Fig.3.37 Deslocamentos totais para o caso axissimétrico – Cenário 3.	55
Fig.3.38 Deslocamentos totais para o caso plano sem interface - Cenário 3.	56
Fig.3.39 Deslocamentos totais para o caso plano com interface - Cenário 3.	56
Fig.3.40 Deslocamentos totais - Cenário 3.	57
Fig.3.41 Deslocamentos totais para o caso axissimétrico – Cenário 4.	58
Fig.3.42 Deslocamentos totais para o caso plano sem interface – Cenário 4.....	58
Fig.3.43 Deslocamentos totais para o caso plano com interface – Cenário 4.....	59
Fig.3.44 Deslocamentos totais - Cenário 4.	60

Fig.3.45 Resumo de todos os deslocamentos nos vários tipos de modelação.	61
Fig.3.46 Rolhões totalmente preenchidos (C1 (esquerda) e C3 (direita)).	61
Fig.3.47 Gráfico relativo à comparação dos deslocamentos.	62
Fig.4.1 Escalão de Venda Nova / Vila Nova - Perfil longitudinal [18].	63
Fig.4.2 Venda Nova II - Perfil longitudinal [18].	65
Fig.4.3 Caverna da central de Frades [18].	65
Fig.4.4 Aproveitamento Venda Nova/Vila Nova (1- Venda Nova /Vila Nova; 2- Venda Nova II; 3- Venda Nova III) [18].	66
Fig.4.5 Representação esquemática do complexo da Central. (azul - Venda Nova II; vermelho - Venda Nova III) [18].	67
Fig.4.6 Perfil longitudinal de Venda Nova III (1-Tomada de água; 2-Túnel em carga; 3-Chaminé de equilíbrio superior; 4-Central; 5-Chaminé de equilíbrio inferior; 6-Túnel de restituição; 7-Restituição) [18].	67
Fig.4.7 Tomada de água – Planta e Corte vertical (respetivamente) [18].	68
Fig.4.8 Chaminé de equilíbrio superior - Perfil longitudinal [18].	68
Fig.4.9 Restituição - Planta geral [18].	69
Fig.4.10 Restituição - Planta e perfil longitudinal [18].	69
Fig.4.11 Chaminé de equilíbrio inferior – Cortes [18].	70
Fig.4.12 Circuito hidráulico na zona da central - Planta e perfil longitudinal [18].	70
Fig.4.13 Central - Corte transversal pelo eixo de um grupo [18].	71
Fig.4.14 Central: câmaras dos grupos, dos transformadores e das comportas [18].	71
Fig.4.15 Central: corte longitudinal [18].	72
Fig.4.16 Zona onde será inserido o rolhão [20].	73
Fig.4.17 Pormenor da zona do rolhão [20].	74
Fig.4.18 Rolhão a definir [21].	76
Fig.4.19 Geometria do rolhão.	76
Fig.4.20 Blindagem [22].	77
Fig.4.21 Malha de elementos finitos e condições fronteira.	77
Fig.4.22 Aplicação das cargas distribuída (esquerda) e pontual (direita).	78
Fig.4.23 Localização esquemática do rolhão [21].	80
Fig.4.24 Comparação do acréscimo da tensão principal máxima e pormenores.	81
Fig.4.25 Deformada do rolhão.	82
Fig.4.26 Deslocamentos dos rolhões, sem e com blindagem.	82
Fig.4.27 Tensão Normal e Tangencial, sem e com blindagem.	83
Fig.4.28 Deslocamentos para o pior e para o melhor maciço.	83

Fig.4.29 Plastificação dos maciços 1 e 3.	84
Fig.4.30 Tensões normal e tangencial dos maciços.	84
Fig.4.31 Comparação do acréscimo da tensão principal máxima, $\Delta\sigma_1$	85
Fig.4.32 Tensão Normal e Tangencial.	86
Fig.4.33 Deslocamentos.	87
Fig.4.34 Geometrias em análise.	88
Fig.4.35 Tensão principal máxima, na zona mais significativa.	88
Fig.4.36 Zonas de plastificação.	89
Fig.4.37 Tensões Normal e Tangencial dos dois casos.	89
Fig.4.38 Deslocamentos para os dois casos.	90
Fig.5.1 Aplicação das injeções do tipo 1 [24].	93
Fig.5.2 Aplicação de injeções do tipo 2 [24].	94
Fig.5.3 Perfis tipo de injeção, para injeções de consolidação e impermeabilização [24].	94
Fig.5.4 Injeções exteriores de consolidação e impermeabilização [26].	95
Fig.5.5 Localização das injeções com resinas (R) [26].	97
Fig.5.6 Localização das juntas verticais [26].	98
Fig.5.7 Sistema de injeção das juntas verticais [26].	98
Fig.5.8 Sistema de injeção blindagem/betão [26].	99
Fig.5.9 Localização de algumas secções sujeitas as injeções de contacto betão/rocha [26].	99
Fig.5.10 Sistema de injeção betão/rocha (Secção E-E e F-F) [26].	100
Fig.5.11 Sistema de injeção betão/rocha (Secção G-G e H-H) [26].	100

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 Parâmetros de classificação - RMR [4].....	7
Quadro 2.2 Classificações das condições das descontinuidades [4].	8
Quadro 2.3 Efeitos da orientação das descontinuidades [4].	8
Quadro 2.4 Classes dos maciços – RMR [4].	9
Quadro 2.5 RQD - Designação da qualidade da rocha (adaptado Apontamentos Geologia de Engenharia).	9
Quadro 2.6 J_n - Índice das famílias de juntas (adaptado Apontamentos Geologia de Engenharia).	10
Quadro 2.7 J_r - Índice de rugosidade das juntas (adaptado Apontamentos Geologia de Engenharia)..	10
Quadro 2.8 J_w - Índice das condições hidrogeológicas (adaptado Apontamentos Geologia de Engenharia).	11
Quadro 2.9 J_a - Grau de alteração das descontinuidades (adaptado Apontamentos Geologia de Engenharia).	12
Quadro 2.10 SRF- Fator de redução de tensões (adaptado Apontamentos Geologia de Engenharia).	13
Quadro 2.11 Valores de D [6].....	16
Quadro 3.1 Valores dos parâmetros geométricos [16].	28
Quadro 3.2 Descrição das diversas Etapas.	32
Quadro 3.3 Deslocamentos máximos e mínimos – Cenário 1.....	52
Quadro 3.4 Deslocamentos máximos e mínimos - Cenário 2.	54
Quadro 3.5 Deslocamentos máximos e mínimos - Cenário 3.	57
Quadro 3.6 Deslocamentos máximos e mínimos - Cenário 4.	59
Quadro 3.7 Quadro resumo dos deslocamentos máximos.....	60
Quadro 4.1 Valores médios do Módulo de Deformabilidade e do índice RMR.	74
Quadro 4.2 Características do maciço.....	75
Quadro 4.3 Descrição das diversas etapas.	79

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

b – Largura do rolhão
c – Coesão (MPa)
cm – Centímetros
DEC - Departamento de Engenharia Civil
E – Módulo de Young (GPa)
EDP – Energias de Portugal
Em – Módulo de deformabilidade médio do maciço rochoso (GPa)
Fig. – Figura
GPa- Gigapascals
GSI – Geological Strength Index
GWh – Gigawatts hora
h – Altura do rolhão
i – Gradiente hidráulico
J_a – Joint alteration number
J_n – Joint set number
J_r – Joint roughness number
J_w – Joint water reduction
km – Quilómetros
kN/m³ – Quilonewton por metro cúbico
kV – Kilovolt
l – Comprimento do rolhão
l/min – Litros por minuto
m – Metros
m³ – Metros cúbicos
m³/s – Metros cúbicos por segundo
mm – Milímetros
MN/m – Meganewtons por metro
MPa – Megapascals
MVA – Megavolt Ampere
MW – Megawatts
p – Intensidade da pressão aplicada no rolhão

p_{pe} – Tensão de corte permitida na interface

Q – Classificação de Barton

r – Raio do rolhão

ref. – Referente

RMR – Rock Mass Rating

rpm – Rotações por minuto

RQD – Rock Quality Designation

SRF – Stress reduction factor

Δh – Carga hidráulica (m)

$\Delta\sigma_1$ – Acréscimo da tensão principal máxima

$\Delta\sigma_3$ – Acréscimo da tensão principal mínima

ν – Coeficiente de Poisson

σ_c – Tensão de compressão (MPa)

σ_t – Resistência à tração (MPa)

Φ – Ângulo de atrito ($^\circ$)

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DA DISSERTAÇÃO

Os recursos naturais, como a água, são fontes de energia renováveis que o Homem tem ao ser dispor para satisfazer as suas necessidades, contudo, as mesmas não são aproveitadas na sua plenitude.

No entanto, fatores como o crescimento da população, o aumento do consumo de energia e a crescente subida do preço do petróleo em conjunto com o novo paradigma da sustentabilidade ambiental, fazem com que cada vez mais se justifique a construção de grandes aproveitamentos hidroelétricos, levando assim ao aproveitamento dos recursos naturais.

Estes fatores, conciliados com as características naturais únicas que a região Norte de Portugal oferece, tornam a zona atrativa para o desenvolvimento deste tipo de aproveitamentos. Estas características naturais vão desde a morfologia do terreno, que se apresenta particularmente montanhoso e acidentado, passando pela elevada pluviosidade do País.

Deste modo têm-se desenvolvido inúmeros aproveitamentos hidroelétricos dos quais, na presente dissertação, iremos abordar dois: Baixo Sabor e Venda Nova III. No Baixo Sabor será analisado um rolhão que terá como objetivo a obturação do túnel de derivação provisória do rio no local da construção da barragem principal do aproveitamento. Já em Venda Nova III, pretende-se analisar o rolhão que promoverá a obturação do túnel a partir do qual foi efetuada a escavação de parte do circuito hidráulico do reforço de potência.

1.2. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

A presente dissertação está organizada em 6 capítulos, sendo o primeiro dedicado a uma breve exposição do tema em estudo bem como a estruturação e objetivos da mesma.

O 2º capítulo é dedicado à exposição do conceito de rolhão. Pretende-se identificar os tipos de rolhões que se utilizam, as suas formas mais comuns, parâmetros de projeto, tais como, o seu comprimento ou como escolher a melhor localização e fazer referência a alguns aspetos construtivos importantes.

A partir do 3º capítulo a dissertação apresenta uma componente de índole mais prática: neste capítulo pretende-se fazer a análise de quatro casos de estudo, inseridos no âmbito do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. De uma forma resumida, o primeiro consiste numa análise das tensões instaladas no rolhão, confrontando quatro geometrias para aferir a solução mais equilibrada.

No segundo caso, pretende-se avaliar a influência da variação do módulo de deformabilidade nos deslocamentos do rolhão. Já no terceiro, o que queremos constatar é a influência da construção de uma gola na zona de montante do rolhão. Por fim, o último caso deste capítulo tem por objetivo estudar, os deslocamentos para vários tipos de modelação (modelação axissimétrica e plana, com e sem interface), para 4 soluções geométricas do rolhão. Também se pretende interpolar a curva teórica dos deslocamentos, correspondente a uma modelação axissimétrica com interface.

No que respeita ao 4º capítulo, o mesmo terá como objetivo a análise de um rolhão a ser construído na barragem de Venda Nova III. Nesta modelação serão efetuadas várias simulações com diferentes objetivos: o primeiro consiste em determinar a influência da utilização de uma blindagem no rolhão, o segundo passa pela análise da influência das características do maciço onde o rolhão está inserido. Já o terceiro, relaciona-se com a constatação da influência do comprimento do rolhão no seu comportamento. Por último, queremos comparar duas geometrias passíveis de serem aplicadas em obra e concluir qual a melhor opção.

No 5º capítulo é feita uma referência ao tema das injeções, assunto sempre presente neste tipo de estruturas. Deste modo, tendo por base a prática mais comum executada pela EDP, abordar-se-á dois casos de interesse: Baixo Sabor e Venda Nova III. O Baixo Sabor corresponderá a um caso corrente de aplicação de injeções, enquanto Venda Nova III, para além da prática corrente, ficará caracterizada por algumas especificidades decorrentes desta obra.

Por último, para o 6º capítulo, está reservada uma análise de todo o trabalho efetuado ao longo da dissertação, pretende-se salientar as dificuldades encontradas e tirar conclusões gerais de todo o trabalho.

1.3. SOFTWARE UTILIZADO NA MODELAÇÃO

O *software* Phase² da Rocscience é um programa desenvolvido com o objetivo de se realizarem modelações bidimensionais do comportamento de maciços rochosos, utilizando o método dos elementos finitos. Para além disso permite realizar análises em estado plano de tensão e em estado axissimétrico. Este tipo de *software* é especialmente utilizado para a análise de escavações subterrâneas e modelos de suporte impostos. Como fator primordial destaca-se o facto de o mesmo possibilitar o faseamento da modelação, ou seja, torna possível prever a evolução do projeto de uma forma detalhada e realista [1].

Deste modo, o programa permite uma variedade de modelos de análise, uma vez que o maciço pode ser considerado como um meio heterogéneo elástico ou elasto-plástico. Admite ainda a presença de juntas, que podem servir para caracterizar descontinuidades, a utilização de suportes de carácter definitivo ou temporário e ainda permite a existência de um nível freático variável.

No entanto, é necessário tecer algumas considerações no que diz respeito à modelação realizada em meio elástico: o *software* permite a determinação do estado de tensão induzido, independentemente

das características resistentes. Já em modelações em meio plástico: as tensões serão redistribuídas para os elementos vizinhos sempre que as forças atuantes forem superiores às resistências de pico, sendo que no elemento plastificado apenas ficarão a atuar os valores que resultam da resistência residual, até que seja atingido um novo equilíbrio.

Embora se aproxime mais do comportamento real dos maciços rochosos, simular a plasticidade requer o conhecimento de parâmetros adicionais que nem sempre estão estabelecidos, de modo que se deve ponderar com cautela a utilização deste modelo.

Outra funcionalidade do *software* consiste na capacidade de gerar malhas de elementos finitos automaticamente, sendo para isso apenas necessário definir parâmetros como: o tipo de elemento (triangular de 3 ou 6 nós ou quadrilátero de 4 ou 8 nós), densidade da malha e o número aproximado de nós que se deseja no contorno das escavações.

No que diz respeito ao estado de tensão *in situ*, tem-se a possibilidade de trabalhar com duas opções: constante ou gravitacional. Podemos definir três valores distintos para as tensões principais, bem como para o seu alinhamento no plano da secção analisada.

Já no que respeita às propriedades dos materiais é necessário definir as propriedades elásticas, como o coeficiente de Poisson, ν , o módulo de Young, E , e dependendo do critério de cedência selecionado os parâmetros de resistência, m_b e s para o critério de Hoek-Brown, e o ângulo de atrito e coesão para o critério de Mohr-Coulomb. Posteriormente seleciona-se também o tipo de comportamento que o material deve ter, elástico ou elasto-plástico, definindo os critérios desejados de resistência residual no caso deste último modelo.

Finalmente, procede-se à análise numérica propriamente dita, que depois de terminada permite que os resultados possam ser visualizados por meio de um *output* gráfico, como isolinhas de tensão, deslocamentos, fatores de segurança, trajetórias de tensões, vetores de deslocamentos, configuração da deformada, elementos plastificados entre outros.

Após tecidas estas breves considerações importa salientar que ao longo da dissertação e em local adequado serão realizadas referências a todos os parâmetros adotados nos casos em concreto de modo a tornar mais perceptíveis os parâmetros utilizados em cada modelação.

2

ROLHÕES

2.1. GENERALIDADES

Na construção de grandes aproveitamentos hidroelétricos é usual a utilização de túneis auxiliares que facilitam a construção dos elementos chave do projeto, tais como os túneis para derivação provisória das águas do rio que tornam possível a construção a seco da barragem ou, ainda, as galerias de ataque aos circuitos hidráulicos, possibilitando assim estratégias construtivas vantajosas para o empreendimento.

Contudo, após terminada a construção da barragem ou dos circuitos hidráulicos, é necessário obstruir os túneis auxiliares de modo a promover o bom funcionamento do empreendimento e alcançar o objetivo para que foi concebido. Deste modo são projetados elementos em betão que se denominam por rolhões. Estas estruturas, devido à sua elevada importância, carecem de uma adequada conceção e dimensionamento tendo em conta a garantia da estabilidade estrutural e hidráulica.

Assim, pretende-se neste capítulo focar os aspetos essenciais do projeto de um rolhão, compilando as noções básicas que são necessárias ter sobre os mesmos. Pretende-se analisar parâmetros tais como: o objetivo que a sua construção deve contemplar, a sua forma, localização no maciço e a carga hidráulica a que deverá resistir, entre outros.

2.2. TIPOS DE ROLHÕES

Os rolhões são estruturas que se podem agrupar em quatro grandes categorias, tendo em conta o objetivo para o qual foram projetados. Deste modo podem apresentar um carácter de emergência, precaução, controlo, temporário e/ou de consolidação [2]. Contudo, todas estas categorias têm um ponto em comum: o facto de, no seu dimensionamento, a ação principal a considerar-se ser a carga hidrostática total que possa vir a instalar-se num dos seus topos.

Deste modo, podemos focar apenas nos pontos que os distinguem. Assim, um rolhão que se enquadre na categoria de emergência é normalmente utilizado para selar um túnel, quando nele ocorrem afluências de água inesperadas e que prejudicam o decorrer dos trabalhos da obra. Já para os de precaução, são mais utilizados em obras rodoviárias, nomeadamente, estradas subterrâneas sendo estes construídos logo no início da obra e permitem diminuir as zonas sujeitas a inundação.

Os de controlo caracterizam-se por serem implementados quando existe uma necessidade de vedar e/ou controlar a afluência de águas das zonas onde já não ocorrem trabalhos para onde os mesmos estão a ser executados, por exemplo, para bloquear o acesso entre túneis que se encontram em paralelo. Este tipo é muito utilizado em obras mineiras e não permite o acesso às zonas inundadas [2].

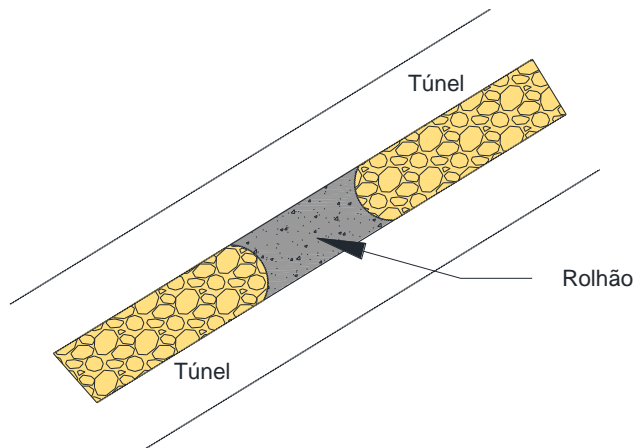


Fig.2.1 Rolhão em túneis paralelos.

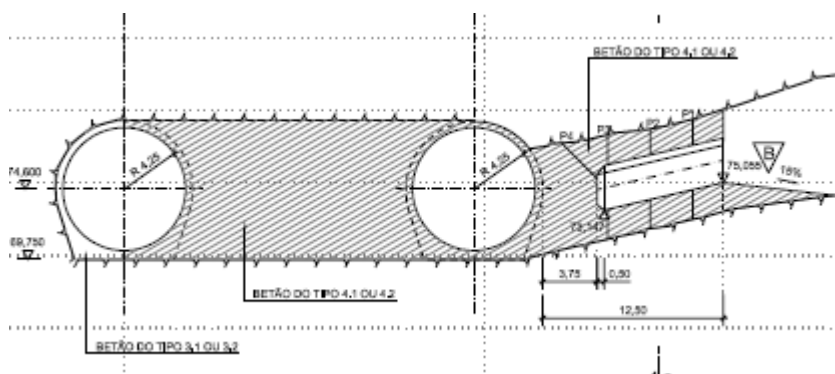


Fig.2.2 Rolhão entre túneis paralelos - Exemplo do reforço de potência de Alqueva (Corte) [3].

Por último, temos os rolhões que se enquadram na categoria de temporários e/ou consolidação. Estes possibilitam a aplicação de injeções e de operações de consolidação do maciço uma vez que controlam ou até mesmo interrompem a afluência de água, permitindo a execução dos trabalhos a seco.

No entanto, os tipos de rolhões que irão ser analisados na presente dissertação contemplam mais do que um objetivo. No caso do Baixo Sabor teremos um rolhão localizado no desvio provisório, sujeito a uma ação com pouca variação no tempo (apenas a oscilação do nível de água na albufeira). Já o rolhão de Venda Nova III estará inserido no túnel em carga. Poderá estar sujeito a uma pressão estática muito elevada, quando temos um nível de água constante, ou a uma sobrepressão dinâmica devido ao movimento de grandes massas de água, quando a central entra em funcionamento. No entanto, nestes dois casos, a estabilidade estrutural deverá estar garantida, assim como o controlo da percolação.

2.3. PARÂMETROS DE PROJETO

2.3.1. LOCALIZAÇÃO DO ROLHÃO NO MACIÇO

A localização do rolhão é condicionada pela condição do maciço rochoso. Usualmente, para se avaliar esta condição, utiliza-se a classificação de Bieniawski, mais comumente designada por índice RMR, em conjunto com a classificação de Barton, conhecida por índice Q, e com a classificação GSI.

O índice RMR pretende avaliar 6 parâmetros (Quadros 2.1 a 2.3), tais como: a resistência à compressão uniaxial, o RQD (Rock Quality Designation), o espaçamento entre as descontinuidades, a condição das mesmas, a afluência de águas subterrâneas à escavação e, por fim, a orientação das descontinuidades.

Para que seja possível aplicar esta classificação a um maciço rochoso é usual proceder a uma divisão em várias regiões estruturais, sendo que as fronteiras de separação poderão coincidir com mudanças de litologia e/ou variações bruscas na classificação do maciço. Em cada avanço que se realiza na escavação de um túnel é necessário efetuar uma nova avaliação deste índice para se verificar se as condições do maciço se mantêm constantes. De seguida apresentam-se os quadros (Quadro 2.1 a Quadro 2.3) que permitem avaliar os parâmetros referidos [4].

Quadro 2.1 Parâmetros de classificação - RMR [4].

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Point Load	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	0,6-2 m	200-500 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Pesos		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes ligeiramente alteradas.	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura <5mm ou juntas contínuas com separação de 1-5mm	Enchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com separação >5mm		
	Pesos		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10m de comprimento do túnel	Nenhum	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	0,5		
		Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Húmido	Escorrimientos	Entrada de água		
		Pesos	15	10	7	4	0		

Quadro 2.2 Classificações das condições das descontinuidades [4].

Comprimento da descontinuidade	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	<0,1mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	>5mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura <5mm	Duro com espessura >5mm	Mole com espessura <5mm	Mole com espessura >5mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Quadro 2.3 Efeitos da orientação das descontinuidades [4].

Direção perpendicular ao eixo do túnel				Direção paralela ao eixo do túnel		Inclinação 0-20°
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação		Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	
Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°			
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável

Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Após serem atribuídas pontuações a estes parâmetros e efetuado o somatório das mesmas, obtemos o índice RMR. Este índice varia num intervalo de 0 a 100 e, tendo por base neste valor, é frequentemente escolhida a solução de suporte a utilizar no túnel, para além de ser possível estimar os parâmetros de comportamento do maciço. Este último parâmetro é o mais relevante na nossa análise, sendo que quanto maior for a pontuação do índice RMR melhor será a qualidade do maciço (Quadro 2.4).

Quadro 2.4 Classes dos maciços – RMR [4].

Peso global	100-81	80-61	60-41	40-21	<21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço rochoso muito bom	Maciço rochoso bom	Maciço rochoso razoável	Maciço rochoso fraco	Maciço rochoso muito fraco
Tempo médio para aguentar sem suporte	20 Anos para 15m de vão	1 Ano para 10m de vão	1 Semana para 5m de vão	10 Horas para 2,5m de vão	30 Minutos para 1m de vão
Coesão da massa rochosa (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito da massa rochosa (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

A classificação denominada por índice Q teve origem na observação de um grande número de obras subterrâneas e consiste na análise de 6 parâmetros que caracterizam o comportamento do maciço. Este índice varia entre 10^{-3} e 10^3 e a sua determinação baseia-se na seguinte equação:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF} \quad (2.1)$$

A expressão é composta por três quocientes, sendo que cada um deles representa uma característica importante do maciço. O primeiro quociente, RQD/J_n , caracteriza a estrutura do maciço rochoso e constitui uma medida do bloco unitário deste, dando uma ideia geral da dimensão dos blocos.

O segundo quociente, J_r/J_a caracteriza as descontinuidades e/ou o seu enchimento sob o aspeto da rugosidade e do grau de alteração. Por último, o terceiro quociente, J_w/SRF , representa o estado de tensão no maciço rochoso, sendo que SRF caracteriza o estado de tensão do maciço em profundidade e o J_w representa a medida da pressão da água [4].

Os quadros que se seguem pretendem resumir os valores passíveis de serem adotados pelos diversos parâmetros da expressão:

Quadro 2.5 RQD - Designação da qualidade da rocha (adaptado Apontamentos Geologia de Engenharia).

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas
"Rock Quality Designation"		R.Q.D.	
A.	Muito Mau	0-25	1. Quando o RQD for <10 (incluindo 0) considera-se um valor nominal de 10 no cálculo de Q 2. Intervalos de 5 no RQD têm precisão suficiente (100, 95, 90...)
B.	Mau	25-50	
C.	Médio	50-75	
D.	Bom	75-90	
E.	Muito bom	90-100	

Quadro 2.6 J_n - Índice das famílias de juntas (adaptado Apontamentos Geologia de Engenharia).

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas
"Joint set number"		J_n	1. Nas intersecções utilizar $3 \times J_n$ 2. Nas embocaduras utilizar $2 \times J_n$
A.	Nenhuma ou poucas descontinuidades presentes	0,5-1	
B.	Uma família de descontinuidades	2	
C.	Uma família mais descontinuidades esparsas	3	
D.	Duas famílias de descontinuidades	4	
E.	Duas famílias mais descontinuidades esparsas	6	
F.	Três famílias de descontinuidades	9	
G.	Três famílias mais descontinuidades esparsas	12	
H.	Quatro ou mais famílias, descontinuidades esparsas, maciços muito fraturados.	15	
I.	Rocha esmagada, tipo terroso	20	

Quadro 2.7 J_r - Índice de rugosidade das juntas (adaptado Apontamentos Geologia de Engenharia).

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas
"Join roughness number"		J_r	1. As descrições das alíneas a) e b) referem-se a escalas de amostragem de pequena e média dimensão, respetivamente 2. Adicionar 1,0 se o espaçamento médio da família de descontinuidades mais relevante for maior que 3m 3. J_r igual a 0,5 pode ser usado para descontinuidades polidas e planas contendo lineações, se essas lineações estiverem orientadas na direção de menor resistência
a) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades b) Contacto entre paredes de rocha antes de 10cm de escorregamento			
A.	Juntas descontínuas	4	
B.	Descontinuidades rugosas, irregulares, onduladas	3	
C.	Descontinuidades suaves e onduladas	2	
D.	Descontinuidades polidas e onduladas	1,5	
E.	Descontinuidades rugosas ou irregulares, planas	1,5	
F.	Descontinuidades lisas, planas	1,0	
G.	Descontinuidades polidas, planas	0,5	
c) Não há contacto entre as paredes de rocha no escorregamento			
H.	Zona contendo minerais argilosos e suficientemente espessa de modo a impedir o contacto entre as paredes	1,0	
I.	Zonas esmagadas contendo areias de modo a impedir o contacto entre as paredes	1,0	

Quadro 2.8 Jw- Índice das condições hidrogeológicas (adaptado Apontamentos Geologia de Engenharia).

Descrição do Parâmetro		Valor		Notas
"Joint water reduction"		Jw	Pressão da água aprox. (Mpa)	1. Os fatores nos casos C a F são estimados para condições naturais; o parâmetro Jw deverá ser aumentado caso sejam efetuadas drenagens 2. Os problemas especiais relacionados com a formação de gelo não são considerados
A.	Escavações secas ou caudal afluído pequeno, isto é <5 l/min localmente	1,0	<0,1	
B.	Caudal médio ou pressão que ocasionalmente arraste o preenchimento das descontinuidades	0,66	0,1-0,25	
C.	Caudal ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0,5	0,25-1	
D.	Caudal ou pressão elevada, com considerável arrastamento do preenchimento das descontinuidades	0,3	0,25-1	
E.	Caudal excecionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	0,2-0,1	>1	
F.	Caudal excecionalmente elevado ou pressão contínua, sem decaimento	0,1-0,05	>1	

Quadro 2.9 J_a - Grau de alteração das descontinuidades (adaptado Apontamentos Geologia de Engenharia).

Descrição do parâmetro		Valor	
"Joint alteration number"		J _a	φ, (°) aprox.
a) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			
A.	Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epibolito)	0,75	-
B.	Paredes não alteradas, somente com leve descoloração	1,0	25-35
C.	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas	2,0	25-30
D.	Paredes com partículas siltosas ou areno-argilosas	3,0	20-25
E.	Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo de atrito, tais como caulite, mica, gesso, talco, clorite, grafite, etc., e pequenas quantidades de argila expansivas	4,0	8-16
b) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades antes de 10cm de escorregamento			
F.	Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, etc.	4,0	25-30
G.	Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado (contínuo, mas com espessura <5mm)	6,0	16-24
H.	Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, mas com espessura <5mm)	8,0	12-16
I.	Descontinuidades com enchimento argiloso expansivo, como por exemplo montmorilonite (contínuo, mas com espessura <5mm); o valor de J _a depende da percentagem de partículas de argila expansiva e do acesso da água, etc.	8-12	6-12
c) Não há contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			
J.	Zonas ou bandas com rochas desintegradas ou esmagadas com argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	6,8 ou 8-12	6-24
K.	Zonas ou bandas siltosas ou areno-argilosas, com pequena fração de argila	5,0	-
L.	Zonas contínuas de argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	10, 13, 13-20	6-24

Quadro 2.10 SRF- Fator de redução de tensões (adaptado Apontamentos Geologia de Engenharia).

Descrição do parâmetro		Valor	Notas	
"Stress Reduction Factor"		SRF	<p>1. Reduzir o índice SRF de 25 a 50% se as zonas de corte influenciarem a escavação sem a atravessarem.</p> <p>2. No caso de maciços rochosos contendo argila, é conveniente obter o índice SRF para as cargas de descompressão. A resistência da matriz rochosa é então pouco significativa. Em maciços muito pouco fraturados e sem argila.</p>	
a) Zonas de fraqueza intersectando as escavações, o que pode causar a descompressão do maciço rochoso durante a abertura destas				
A.	Zonas de fraqueza frequentes, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente; maciço rochoso envolvente muito descomprimido (todas as profundidades)	10,0		
B.	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades de escavação $\leq 50\text{m}$)	5,0		
C.	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades de escavação $> 50\text{m}$)	2,5		
D.	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)	7,5		
E.	Zonas individuais de corte em rocha competente, sem argila (profundidades da escavação $\leq 50\text{m}$)	5,0		
F.	Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila (profundidade de escavação $> 50\text{m}$)	2,5		
G.	Juntas abertas, rocha muito fraturada e descomprimida (todas as profundidades)	5,0		
b) Rocha competente, problemas de tensões na rocha			σ_c/σ_1	σ_t/σ_1
H.	Tensões baixas, próximo da superfície	2,5	> 200	> 13
I.	Tensões médias	1,0	200-10	13-0,66
J.	Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade; pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0,5-2,0	10-5	0,66-0,33
K.	Explosões moderadas de rochas (rocha maciça)	5-10	5-2,5	0,33-0,16
L.	Explosões intensas de rochas (rocha maciça)	10-20	$< 2,5$	$< 0,16$
c) Rocha esmagada: plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha				
M.	Pressão moderada da rocha esmagada	5-10		
N.	Pressão elevada da rocha esmagada	10-20		
d) Rochas expansivas: atividades química expansiva devida à presença da água				
O.	Pressão de expansão moderada	5-10		
P.	Pressão de expansão elevada	10-15		

Por fim, obtido o valor do índice Q e utilizando o ábaco que se segue, é possível determinar a qualidade do maciço e o tipo de suporte que deverá ser aplicado.

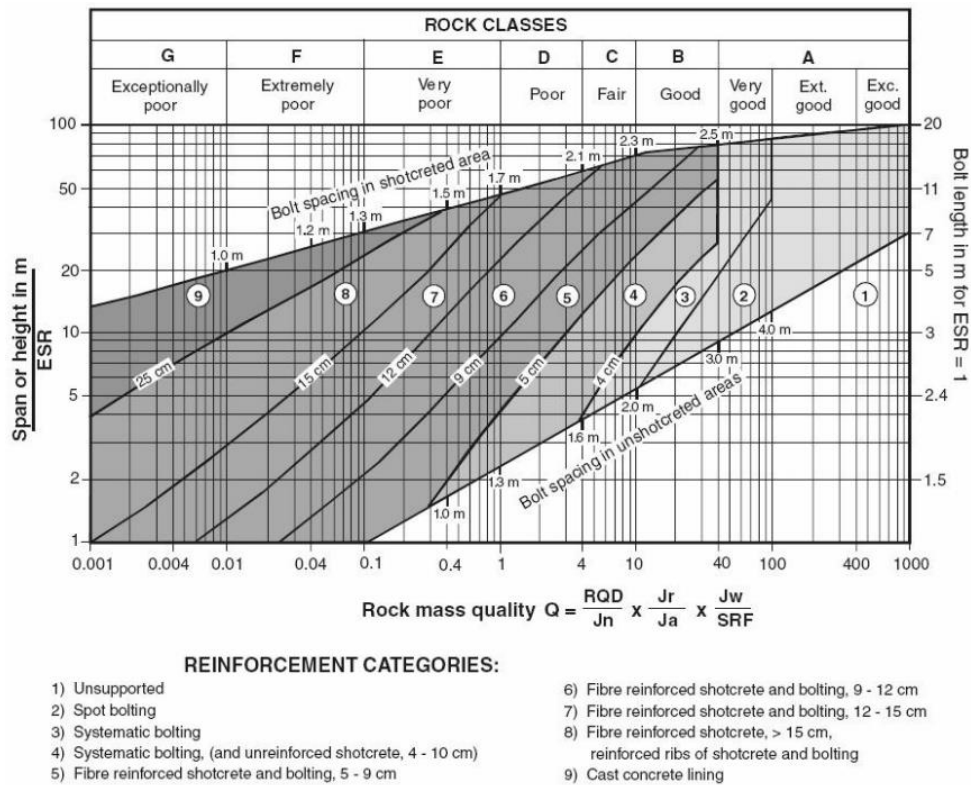


Fig.2.3 Ábaco que relaciona o Índice Q com o tipo de suporte e a qualidade da rocha [5].

A última classificação foi desenvolvida por Hoek (1994) e denomina-se por GSI. Este sistema de classificação varia entre 0 e 100 (Fig.2.4) e baseia-se no princípio que a resistência do maciço rochoso depende das características da rocha intacta, assim como, da liberdade que os blocos de rocha têm para escorregar ou rodar sob o efeito de diferentes condições de tensão [6].

Por sua vez, esta classificação é facilmente relacionável com as anteriores, assim temos que:

$$GSI = RMR - 5 \text{ (para } RMR \geq 23 \text{)} \quad (2.2)$$

$$GSI = \ln Q' + 44 \quad (2.3)$$

Onde Q' é obtido através da seguinte expressão:

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (2.4)$$







GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		<p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p> <p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> <p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> <p>POOR Sticksided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> <p>VERY POOR Sticksided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p>				
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY					
 INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities		90			N/A	N/A
 BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		80	70			
 VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			60	50		
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity				40	30	
 DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces					20	
 LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes						10
	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES					

Fig.2.4 Determinação aproximada do valor do GSI [6].

Uma possibilidade que estas classificações oferecem é a determinação do módulo de deformabilidade do maciço. Utilizando o índice RMR temos que o módulo é dado pela expressão [6]:

$$\text{Bieniawski (1978)} \rightarrow E_m(\text{GPa}) = 2RMR - 100 \text{ para } RMR > 50 \quad (2.5)$$

$$\text{Serafim e Pereira (1978)} \rightarrow E_m(\text{GPa}) = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad (2.6)$$

$$\text{Hoek e Brown [7]} \rightarrow E_m(\text{GPa}) = \frac{\sqrt{\sigma}}{10} \times 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad (2.7)$$

Para o índice Q apresentam-se as seguintes expressões [6]:

$$\text{Barton (1992)} \rightarrow E_m(\text{GPa}) = 25 \log_{10} Q \quad (2.8)$$

$$\text{Barton e Quadros (2002)} \rightarrow E_m(\text{GPa}) = 10 Q^{1/3} \quad (2.9)$$



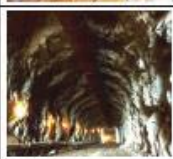


Por último, utilizando o GSI podemos estimar o módulo de deformabilidade do maciço rochoso através das seguintes equações propostas por Hoek et al. (2002) [6]:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \text{ para } \sigma_c \leq 100 \text{ MPa} \quad (2.10)$$

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \text{ para } \sigma_c > 100 \text{ MPa} \quad (2.11)$$

O valor de D é um fator que depende do grau de perturbação ao qual o maciço foi exposto devido ao uso de explosivos durante a escavação. O quadro que se segue dá uma indicação do valor a adotar.

Quadro 2.11 Valores de D [6].

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	D = 0
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	D = 0 D = 0.5 No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	D = 0.8
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	D = 0.7 Good blasting D = 1.0 Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	D = 1.0 Production blasting D = 0.7 Mechanical excavation

Deste modo temos elementos que nos ajudam a caracterizar e a escolher a melhor localização do rolhão. Contudo, é necessário ter em atenção que o mesmo não deverá ser colocado em zonas conturbadas que possam criar caminhos de percolação. Também não é aconselhável que seja colocado perto de zonas muito fraturadas onde existiu uma grande alteração do estado de tensão do maciço. Neste tipo de zonas a permeabilidade do maciço, assim como, o seu parâmetro de deformabilidade são grandemente afetados. Por último, é necessário excluir as zonas que possam vir a ser afetadas pelos movimentos do maciço, resultantes de escavações vizinhas.

2.3.2. FORMA DO ROLHÃO

Quanto à forma do rolhão, ou seja a sua geometria em projeto, esta pode ser essencialmente de três tipos [2]. Uma primeira secção, a mais elementar, consiste na mera construção de uma parede de betão podendo esta ser armada ou não.

No caso do betão ser armado, o rolhão pode se apresentar com uma forma retangular (Fig.2.5), no entanto caso não seja, é necessário que este se apresenta sobre a forma de arco (Fig.2.6), de modo a que haja uma redistribuição de tensões. Ambas as formas são calculadas como se estivessemos a tratar de um problema de paredes em betão, onde é necessário proceder ao cálculo, não só dos momentos flectores, como das forças de corte e axiais que resultam da aplicação da pressão da água na estrutura. Estas formas apesar de eficientes no que diz respeito à função estrutural apresentam lacunas quando se analisam os problemas de percolação.

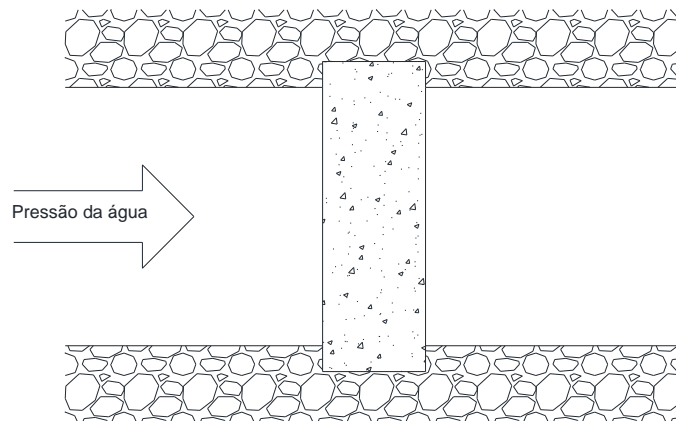


Fig.2.5 Rolhão retangular (betão armado).

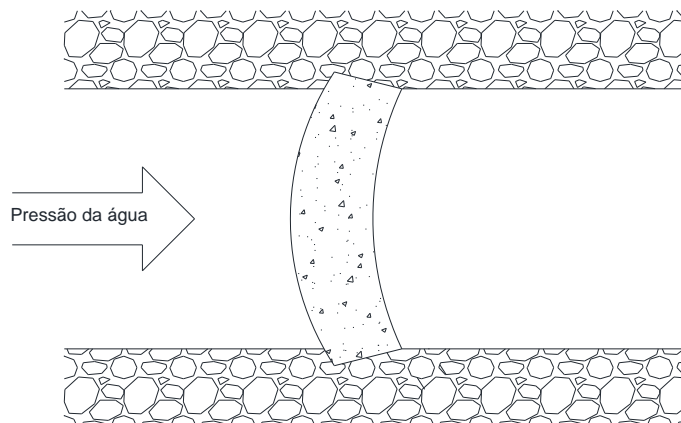


Fig.2.6 Rolhão em arco (betão simples).

Uma segunda forma surge intrinsecamente ligada ao próprio conceito de rolhão, esta nova geometria é semelhante à de uma rolha. O seu comprimento (Fig.2.7), em relação ao caso anterior, é maior o que faz com que as condições hidráulicas do elemento de obra melhorem, não comprometendo o desempenho estrutural. Podemos assim concluir que o aumento do comprimento diminui os problemas de percolação [2].

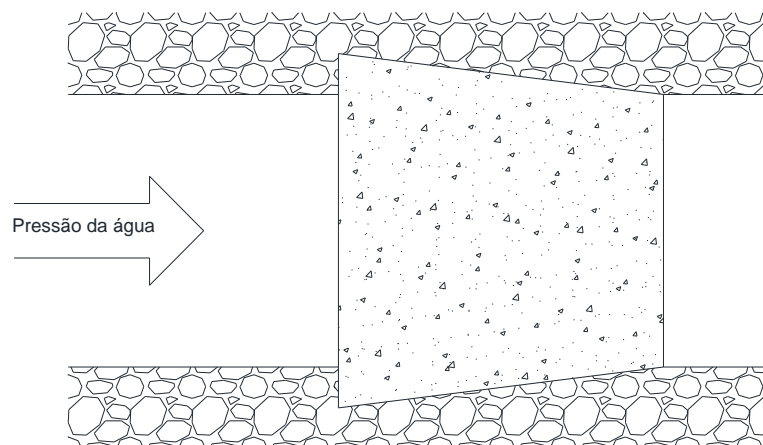


Fig.2.7 Forma do tipo 2.

No entanto este tipo de secção requiere uma elevada quantidade de betão e armadura, para além de uma sobreescavação do maciço, resultando numa solução que poderá ser pouco económica. O último tipo de secção, a que torna o rolhão eficiente quer estruturalmente como a nível de controlo de fugas, caracteriza-se por ser, em alguns casos, um rolhão retangular (Fig.2.8) onde apenas se procedeu ao simples preenchimento de uma zona do túnel ao longo de um comprimento significativo. Porém, tal como na secção anterior, existe um grande gasto de betão o que leva, mais uma vez, a uma solução não económica.

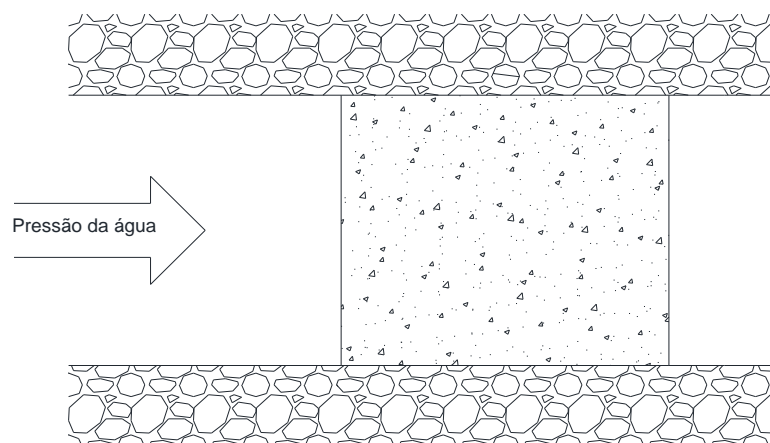


Fig.2.8 Rolhão retangular.

Daí que, esta forma apresenta variantes mais vantajosas que permitem não só, a redução dos custos associados ao consumo de betão e armadura como também, permite o acesso de pessoas e veículos (Fig.2.9 e Fig.2.10). O facto de permitir o acesso faz com que seja possível proceder a inspecções periódicas de modo a detetar e permitir corrigir anomalias da estrutura, tais como afluições de água acima do expectável. Também possibilita a transposição do rolhão para proceder à limpeza para além da zona obturada, de elementos como por exemplo, os desarenadores e o túnel em carga, no caso de Venda Nova III.

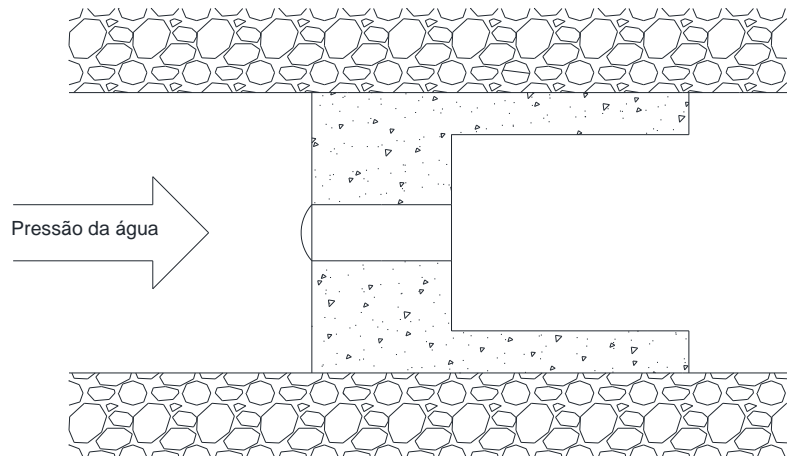


Fig.2.9 Rolhão de secção retangular que permite acesso a pessoas (utilização de blindagem dotada de porta estanque).

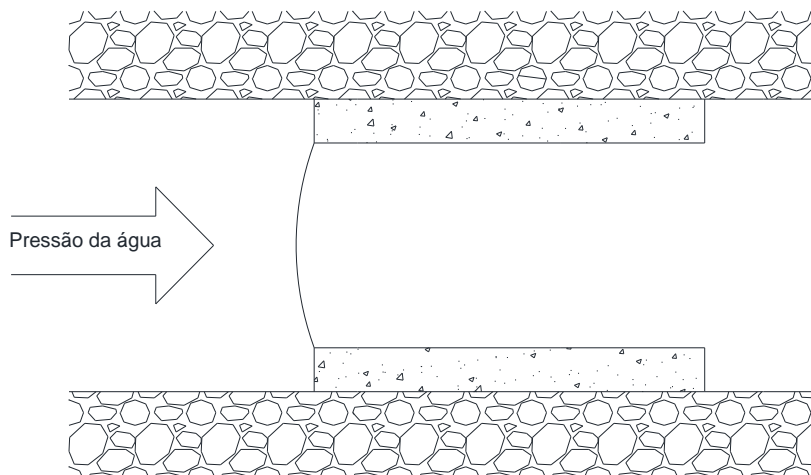


Fig.2.10 Rolhão de secção retangular que permite o acesso rodoviário e a equipamentos (utilização de blindagem dotada de porta estanque).

2.3.3. DIÂMETRO E COMPRIMENTO DO ROLHÃO.

No que respeita ao diâmetro do rolhão, este deve ser tal que preencha toda a secção do túnel e que proporcione uma interface rolhão-maciço eficaz. Caso seja necessário, a interface poderá ser melhorada, procedendo ao desmonte e saneamento cuidadoso do maciço rochoso, para que haja uma otimização do contacto.

De acordo com a escola Norueguesa, o comprimento do rolhão, poderá ser estimado tendo em conta o gradiente hidráulico. Este parâmetro, que na prática será um parâmetro adimensional, relaciona a carga hidráulica com o comprimento do rolhão e varia, correntemente, entre 20 e 50 [8]. Deste modo, temos que:

$$i = \frac{\Delta h}{l} \text{ sendo que } 20 \leq i \leq 50 \quad (2.12)$$

Logo, o comprimento do rolhão varia entre:

$$\frac{\Delta h}{50} \leq l \leq \frac{\Delta h}{20} \Leftrightarrow 0.02 \cdot \Delta h \leq l \leq 0.05 \cdot \Delta h \quad (2.13)$$

Determinando o comprimento do rolhão através desta abordagem, verificamos que o mesmo varia entre 2 a 5% da carga hidrostática aplicada.

No entanto, uma outra abordagem feita pela mesma escola, a chamada “*Regra de Ouro*”, afirma que o comprimento do rolhão deverá variar entre 3 e 5% da carga hidrostática aplicada [8].

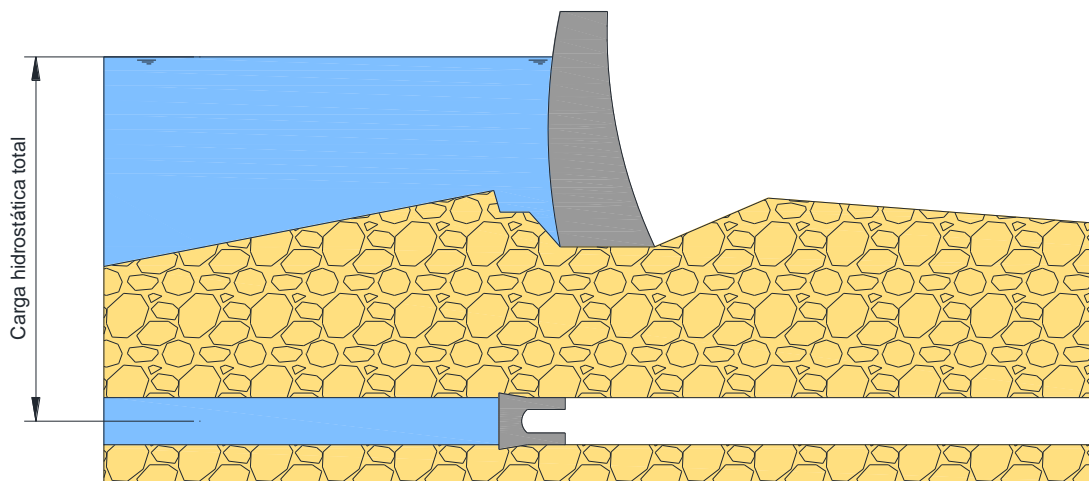


Fig.2.11 Carga hidrostática total.

A comparação dos dois intervalos leva-nos a concluir que a “*Regra de Ouro*”, adotada pela escola Norueguesa, está pelo lado da segurança, uma vez que apresenta um intervalo ligeiramente mais restrito.

Por outro lado autores como Garrett e Campbell Pitt [9] defendem uma outra abordagem. Os mesmos desenvolveram em 1961 expressões matemáticas que têm como objetivo determinar o comprimento do rolhão, num primeiro caso tendo em conta a tensão de corte do betão e/ou do maciço na interface e num segundo atendendo à capacidade de carga, mais uma vez, do betão e/ou do maciço na interface.

A primeira expressão analítica foi deduzida considerando que o rolhão apresenta uma secção retangular e que o plano da interface betão-maciço constitui uma superfície de rotura. Assim chegaram à seguinte expressão:

$$pbh = 2(b + h)lp_{pe} \quad (2.14)$$

Sendo:

- p – a intensidade da pressão aplicada;
- b – a largura do rolhão;
- h – a altura do rolhão;
- l – o comprimento do rolhão;
- p_{pe} – a tensão de corte permitida na interface.

Colocando o comprimento do rolhão em evidência temos:

$$l = \frac{pbh}{2(b + h)p_{pe}} \quad (2.15)$$

Como nos casos mais correntes, o rolhão apresenta uma secção circular, de raio r , chegamos à seguinte expressão para determinar o comprimento:

$$p\pi r^2 = 2\pi rlp_{pe} \Leftrightarrow l = \frac{pr}{2p_{pe}} \quad (2.16)$$

Já a segunda expressão analítica que Garrett e Campbell Pitt deduziram resulta de uma abordagem mais complexa. Eles partem do pressuposto que o mecanismo de rotura estará relacionado com a capacidade de carga do maciço ou do betão. Assim, idealizaram um modelo (Fig.2.12) onde o mecanismo de interação poderá ser obtido através de vários planos inclinados em relação ao eixo do túnel, de um ângulo α .

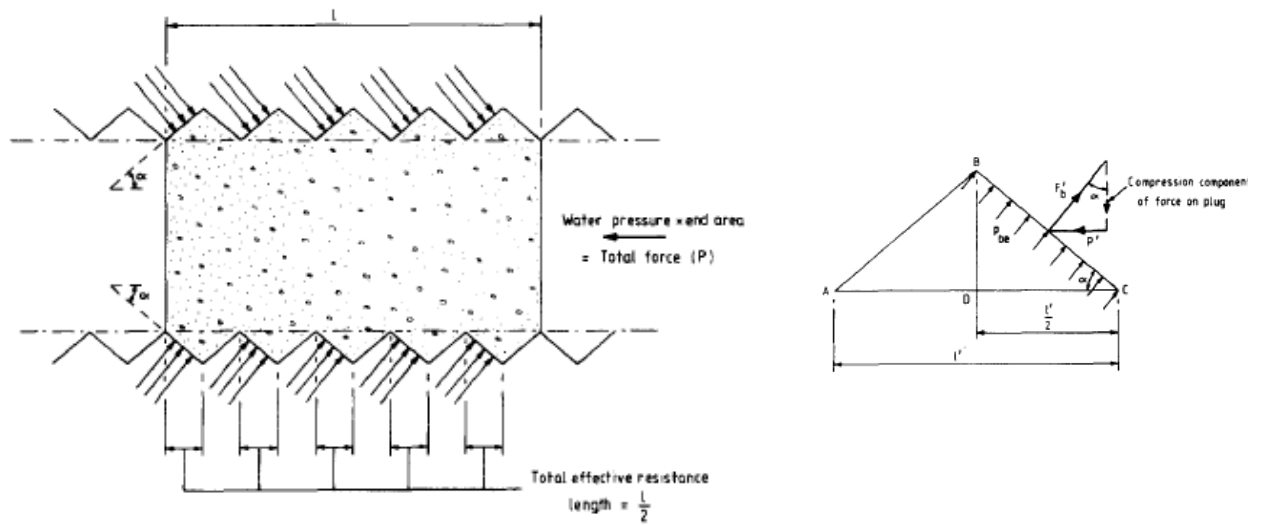


Fig.2.12 Modelo idealizado por Garrett e Campbell Pitt [9].

Através deste modelo, para um rolhão semelhante ao representado na Fig.2.8, de secção circular com raio r e onde $\alpha=45^\circ$, eles obtiveram a seguinte expressão para determinar o comprimento do rolhão:

$$p\pi r^2 = 2\pi r \frac{l}{2} p_{be} \Leftrightarrow l = pr/p_{be} \quad (2.17)$$

Os significados dos termos da expressão são semelhantes aos descritos para a equação 2.14.

Já para os rolhões semelhantes ao da Fig.2.7, o modelo apresenta uma ligeira alteração. Essa alteração corresponde à introdução do fator β , sendo que este representa a inclinação média das faces do rolhão, em relação à orientação do eixo do túnel a obturar.

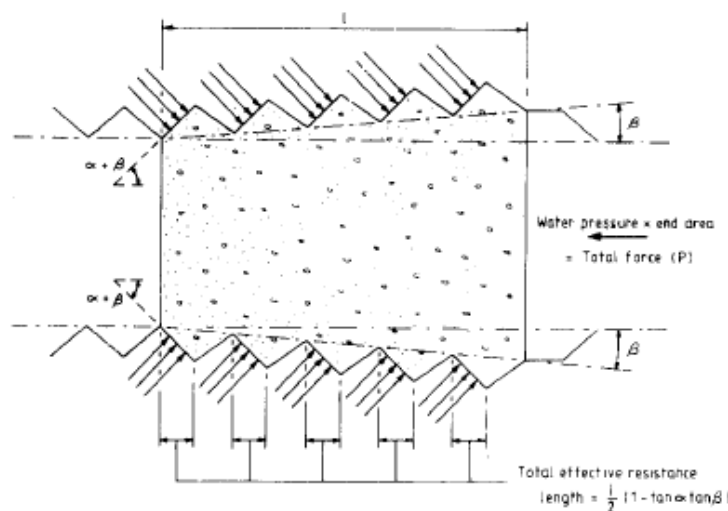


Fig.2.13 Modelo para um rolhão com as faces inclinadas de um ângulo β [9].

Com este modelo, novamente para uma secção circular de raio r e com $\alpha=45^\circ$, o comprimento do rolhão é dado pela seguinte expressão:

$$l = 2 \left[\frac{p^2 r_{máx}^4}{(r_{máx} + r_{min})^2 \cdot p_{pe}^2 \cdot (1 + \tan \beta)^2} - (r_{máx} - r_{min})^2 \right]^{1/2} \quad (2.18)$$

Onde:

- l – comprimento do rolhão;
- p – intensidade da pressão aplicada;
- $r_{máx}$ e r_{min} - respetivamente, raio máximo e mínimo do rolhão;
- β – inclinação das faces do rolhão;
- p_{pe} – a tensão de corte permitida na interface.

2.4. ASPETOS CONSTRUTIVOS

Durante a fase de escavação do túnel devem ser tomadas precauções para minimizar os danos na vizinhança do maciço. Preferencialmente devem-se usar equipamentos de corte em vez dos explosivos, para diminuir as vibrações induzidas nos maciços e a possibilidade de aumentar a sua fracturação.

As características do betão podem ser muito variáveis desde que tenham uma resistência suficiente para suportar as cargas aplicadas. Porém, a escola Norueguesa defende que a permeabilidade do betão não deverá ser superior a 10^{-11} m/s e a penetração da água no betão quando sujeito a um período de carga de três dias (1º dia - 0.3MPa; 2º dia - 0.5MPa; 3º dia - 0.7MPa), não deverá ser superior a 25mm [10]. Para que este critério seja possível de cumprir o betão, na sua constituição, deverá ter uma fração superior a 8% de inertes passados no peneiro 25mm e uma razão água/cimento inferior a 0,5. Deverão ainda ser asseguradas as condições de trabalhabilidade ótimas aquando da sua utilização na betonagem.

A betonagem do rolhão é um processo que carece de um adequado planeamento. Neste planeamento deverão constar procedimentos como a limpeza e saneamento da zona onde o rolhão irá ser instalado e a definição do local onde se irá proceder á mistura dos componentes do betão. Quando se inicia a betonagem da estrutura deverá estar garantido um abastecimento ininterrupto de betão, uma vez que este procedimento terá de ser contínuo para que não haja juntas horizontais. Daí que é preciso definir se a composição do betão será feita em central de betão ou se os equipamentos terão de ser deslocados para o local onde a betonagem irá ser realizada. No entanto, o abastecimento de agregados, cimento e água também não deverá ser descurado.

Outro aspeto construtivo a ter em conta é a garantia que o rolhão é uma estrutura impermeável, usualmente as fugas de água podem-se suceder através do betão no caso de este ser demasiado poroso, ou se existirem juntas e/ ou fissuras. Também podem ocorrer através da interface betão-maciço, frequentemente no topo do rolhão, por dificuldade da betonagem preencher toda a secção do rolhão. Por fim, as fugas também podem ocorrer através do próprio maciço, sendo que o mais frequente de ocorrer são as fugas através de descontinuidades que o maciço contém [2]. Para colmatar os problemas de fugas utilizam-se injeções, este tópico será abordado no Capítulo 5.

3

BAIXO SABOR

3.1. ENQUADRAMENTO

O primeiro caso de estudo enquadra-se no aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. Este aproveitamento localiza-se no distrito de Bragança e ficará implementado no rio Sabor junto da foz com o rio Douro.

Segundo dados disponibilizados pela EDP o aproveitamento hidroelétrico irá mais do que duplicar a capacidade de armazenamento de água na bacia hidrográfica do Douro, isto traduz-se num armazenamento útil de 630 milhões de m³. Este aproveitamento será constituído por dois escalões: no escalão de jusante a albufeira terá uma extensão de aproximadamente 9.6 km já no escalão de montante estender-se-á ao longo de 60 km [11].

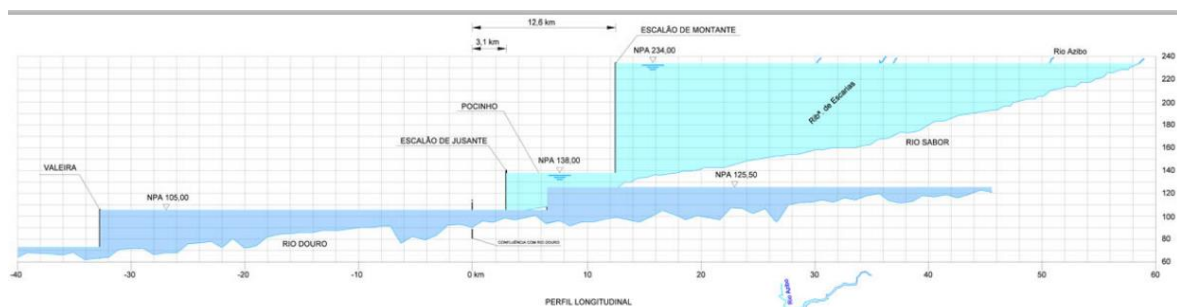


Fig.3.1 Perfil Longitudinal do aproveitamento [12].

Com o intuito de otimizar a produção energética irão ser instalados grupos reversíveis. Estes grupos vão permitir não só turbinar a água para produzir energia, como restituir a mesma na albufeira através do processo de bombeamento.

Dados do projeto indicam que o escalão de montante (Fig.3.2 e Fig.3.3) será constituído por uma central em poço na margem direita, dois circuitos hidráulicos subterrâneos independentes para cada um dos dois grupos reversíveis, uma barragem abóbada contendo um descarregador de cheias controlado por comportas, descarga de fundo no corpo da barragem e uma bacia de dissipação [13].

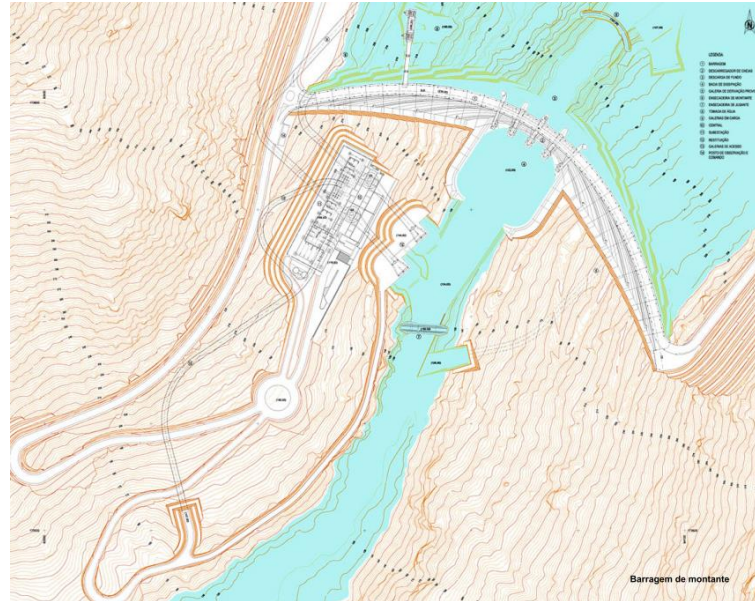


Fig.3.2 Planta do escalão de montante [14].



Fig.3.3 Antevisão do escalão de montante [11].

Já no escalão de jusante (Fig.3.4 e Fig.3.5) prevê-se que tenha uma central em poço na margem direita com dois grupos reversíveis com circuitos hidráulicos subterrâneos independentes, tal como no escalão de montante. Será uma barragem de gravidade, com o descarregador de cheias localizado na parte central da barragem. Por sua vez este será controlado por comportas, sobre soleiras que se estendem para jusante criando assim uma bacia de dissipação de energia do tipo rolo [13].

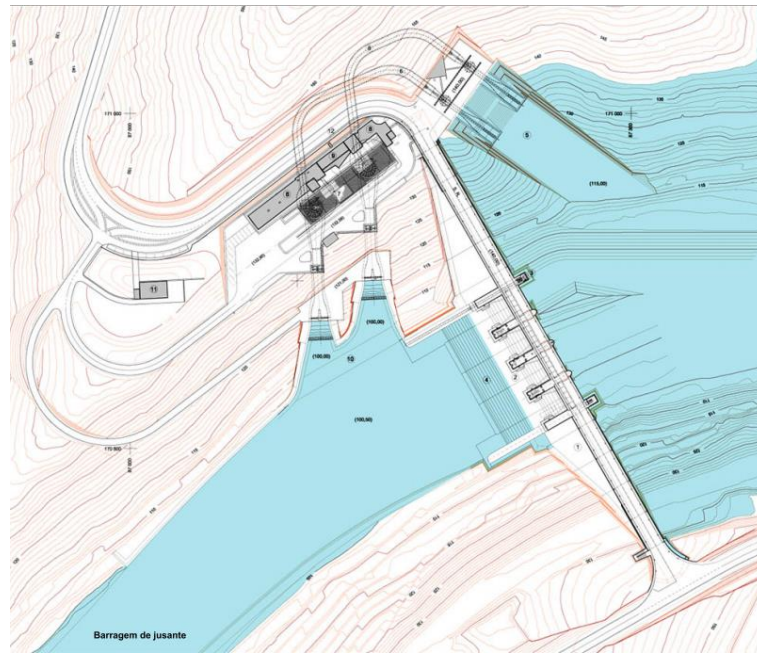


Fig.3.4 Planta do escalão de jusante [15].



Fig.3.5 Antevisão do escalão de jusante [11].

De um ponto de vista ambiental e da segurança do aprovisionamento energético este empreendimento cumpre os objetivos do interesse público contribuindo para a regularização e garantia de caudais na bacia hidrográfica do Douro e inserindo-se na política nacional de diminuição da emissão dos gases com efeito de estufa.

Para além disso, a grande capacidade de armazenamento proporciona uma independência energética. Prevê-se que a produção energética ronde os 444GWh, energia suficiente para abastecer todo o distrito durante um ano.

Esta obra iniciou-se em Junho de 2008 e tem como data prevista para entrada em serviço de Agosto 2014, representa um investimento de 481 Milhões de euros cujo retorno é a longo prazo [11].

Apresentado que está o aproveitamento hidroelétrico, passemos ao caso de estudo deste capítulo. Assim, o mesmo está relacionado com a construção do escalão de montante.

Para ser possível dar início à construção foi necessário desviar o caudal, ou seja, colocar o leito do rio a seco. Esse desvio foi efetuado através de um túnel denominado por desvio provisório que após a conclusão dos trabalhos terá que ser fechado através da construção de um rolhão. Este rolhão será o nosso objeto de estudo.

Antes de qualquer cálculo analítico é crucial definir a geometria da estrutura em causa. No nosso caso, este parâmetro poderá apresentar 4 cenários possíveis. Na imagem que se segue estão indicados os parâmetros que sofrem alteração e na tabela os valores dos mesmos (Fig.3.6 e Quadro 3.1).

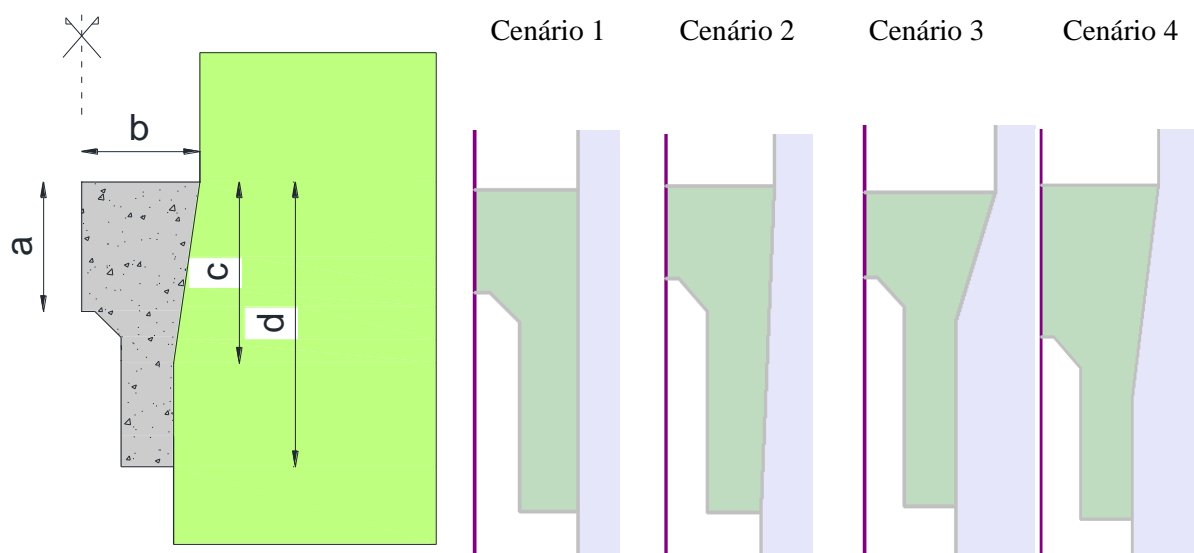


Fig.3.6 Caracterização geométrica do rolhão [16].

Quadro 3.1 Valores dos parâmetros geométricos [16].

Parâmetros	Cenários			
	1	2	3	4
a	3.5	3.0	3.0	5.0
b	3.5	4.0	5.0	4.5
c	0	11	4.5	7.0
d	11	11	11	11

3.2. MODELAÇÃO

O processo de modelação de uma estrutura requer a introdução de parâmetros no *software*, esses parâmetros vão desde a geometria (analisada em 3.1) às características dos materiais, não excluindo aspetos como a geração da malha de elementos finitos ou o estado de tensão inicial. Estes parâmetros são gerais, sendo que, quando forem adotados parâmetros específicos em alguma das análises os mesmos serão referidos em local apropriado. O programa utilizado será o Phase².

3.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO E DO BETÃO

O maciço foi considerado como sendo um material homogêneo e isotrópico que obedece ao critério de cedência de Mohr-Coulomb. Temos como parâmetros elásticos um módulo de deformabilidade (E) de 15GPa e um coeficiente de Poisson (ν) de 0.3. Já para os parâmetros de cedência adotaram-se os seguintes valores: coesão (c) igual a 0.5MPa e ângulo de atrito (ϕ) igual a 35°.

O betão foi modelado como tendo um comportamento elástico, apresentando um módulo de deformabilidade (E) igual a 30GPa e um coeficiente de Poisson (ν) de 0.25.

3.2.2. TIPOS DE ANÁLISE

As análises realizadas serão essencialmente de três tipos: a primeira consiste num modelo axissimétrico, a segunda é um modelo em estado plano onde não existe interface entre o betão e o maciço funcionando assim como um meio contínuo. Na última análise, pretende-se avaliar qual a influência da existência de uma interface entre o betão e o maciço.

A utilização da interface faz com que o meio deixe de ser contínuo, ou seja, não há ligação entre o betão e o maciço tornando as malhas de elementos finitos independentes. Para se materializar esta interface foi admitida que a junta do lado do betão apresenta as mesmas propriedades deste. O mesmo se fez para a junta do lado do maciço para que houvesse uma concordância de propriedades.

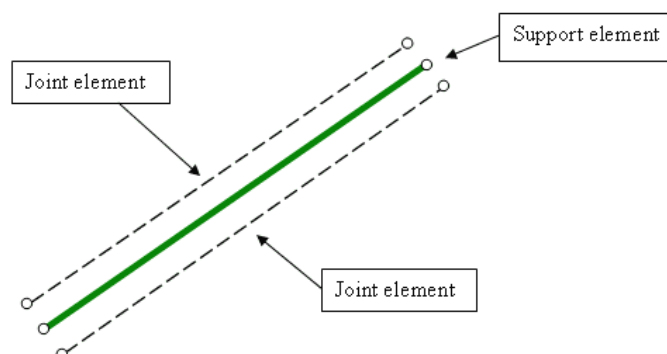


Fig.3.7 Materialização da interface [17].

O elemento de suporte entre as juntas foi definido como sendo uma camada de betão projetado com 5cm de espessura e cujas características resistentes eram similares às do betão utilizado no rolhão.

No programa a existência da interface é materializada pela linha a azul entre o rolhão e o maciço. É importante salientar que a utilização da interface só é possível nas modelações em estado plano, constituindo assim uma limitação do programa quando se utiliza o modelo axissimétrico.

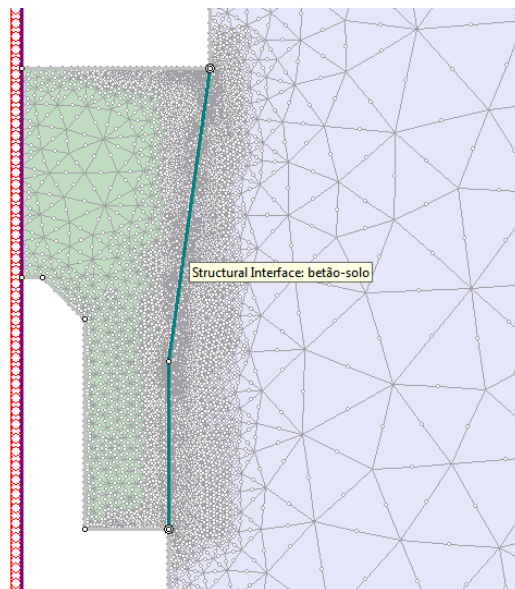


Fig.3.8 Materialização da interface no Phase².

3.2.3. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS E CONDIÇÕES FRONTEIRA

A malha de elementos finitos gerada tem por base triângulos com 6 nós. A escolha deste tipo de malha possibilita uma maior discretização do problema levando a resultados mais precisos.

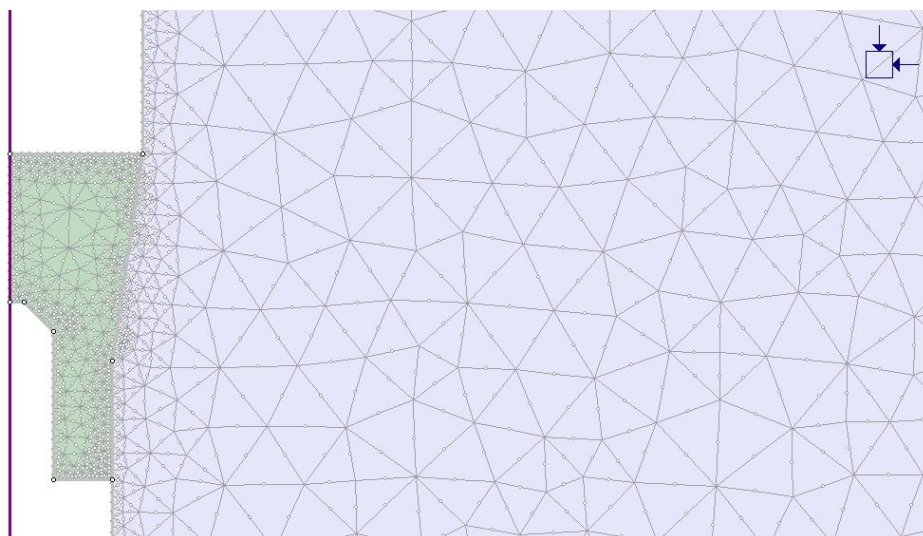


Fig.3.9 Discretização da malha de elementos finitos

Como condições fronteira adotou-se um apoio de roletes que permitem deslocamentos verticais na zona onde ocorre a escavação do túnel e onde irá ser construído o rolhão, e apoios duplos nas restantes fronteiras, estando assim impedidos os deslocamentos nas duas direções.

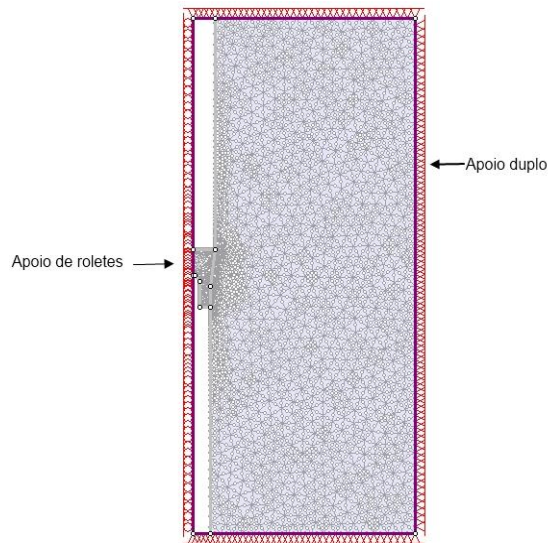


Fig.3.10 Condições fronteira.

3.2.4. ESTADO DE TENSÃO INICIAL E PRESSÃO APLICADA NO ROLHÃO

Para este maciço foi considerado um estado de tensão inicial isotrópico de valor igual ao peso da própria rocha acima da galeria. Considerando que o peso volúmico do maciço é de 25KN/m^3 constatou-se que a tensão inicial seria de 1MPa , constante em todas as direções.

A pressão aplicada na face exterior de montante do rolhão apresenta uma distribuição uniforme com valor igual à pressão da água correspondente à diferença de cotas entre o rolhão e a cota máxima da albufeira. Assim a pressão tomará o valor de 1.13MPa e será aplicada não só no rolhão como nas paredes do túnel, tornando a análise do problema mais realista.

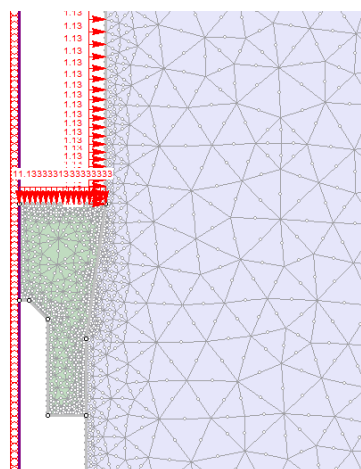


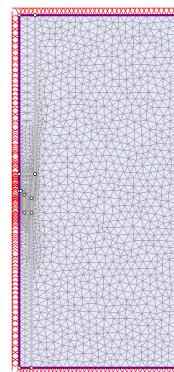
Fig.3.11 Aplicação das cargas distribuídas.

3.2.5. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Após a descrição de todos os parâmetros envolvidos na modelação, também é relevante mostrar a sequência das operações, as denominadas Etapas, que nos permitiram obter os resultados:

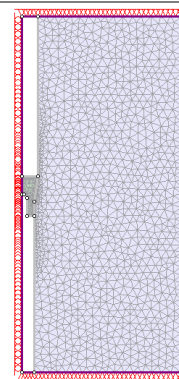
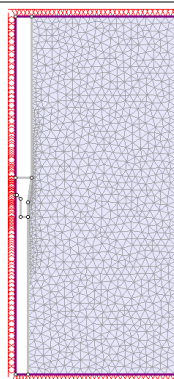
Quadro 3.2 Descrição das diversas Etapas.

A Etapa1 caracteriza-se por ser a fase onde se cria todo o problema. O primeiro passo consiste na criação da geometria da modelação, atribuição das características do maciço, das condições fronteira e geração da malha de elementos finitos.

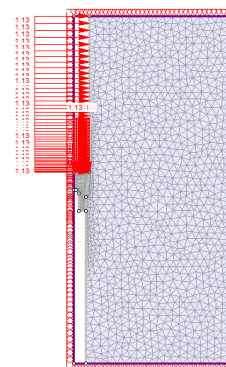


A Etapa2 (esquerda) pretende-se simular a escavação total do túnel onde o rolhão será inserido.

Já na Etapa3 (direita), encontra-se representada a betonagem do rolhão.



Por último, na Etapa4 aplicam-se as cargas a que o rolhão e o túnel estarão sujeitos. Neste caso, e como já foi referido em 3.2.4, toma o valor de 1.13MPa.



Uma nota importante é que ao longo das análises serão referidos se os resultados apresentam a influência de todos as Etapas, ou seja, se é referente à Etapa1 ou se apenas pretende demonstrar os incrementos que a aplicação da carga causa nos resultados. Neste último, aparecerá uma referência à Etapa3 quando se estiver a analisar os resultados da Etapa4.

3.3. INTRODUÇÃO AO CASO DE ESTUDO

Neste capítulo irão constar quatro casos de estudo: o primeiro terá por base os modelos axissimétricos tendo como objetivo concluir qual a melhor solução a ser aplicada em obra, dentro das 4 geometrias possíveis. Para escolher a solução irá se proceder à análise das tensões normais e tangenciais de cada cenário e compará-los entre si. Estas tensões serão medidas ao longo do contacto entre o rolhão e o maciço e têm como referência o estado de tensão inicial (Etapa1).

O segundo caso analisado, em modelo axissimétrico, pretende constatar qual a influência do módulo de deformabilidade (E) nos deslocamentos do rolhão, a Etapa 3 servirá como referência. Este estudo terá uma particularidade: os parâmetros de resistência do maciço, ϕ , c e σ_T , serão estimados através de um *software* denominado RocLab. Posteriormente, mantendo os mesmos constantes, faremos variar o módulo de deformabilidade num intervalo que vai desde 10GPa até aos 40GPa.

No terceiro caso, o estudo incidirá sobre a influência que a construção de uma gola, a montante do rolhão, induzirá no maciço. As características dessa gola serão expostas mais à frente. Para efetuar a comparação irão ser analisados os acréscimos nas tensões principais máxima e mínima, assim como, as zonas que sofrem plastificação. Estes acréscimos são estudados usando como referência a Etapa3.

Por outro lado, também se pretende avaliar qual a influência da gola na tensão normal e na tensão tangencial ao longo do contacto entre o rolhão e o maciço. Para isso, tendo em conta o estado de tensão inicial (Etapa1) faremos uma comparação dos resultados. Os resultados que vão servir de base para comparação são os já obtidos em análises anteriores.

Por último, no quarto caso de estudo, pretende-se realizar uma análise que terá dois propósitos: o primeiro consiste em analisar o comportamento relativo no que respeita aos deslocamentos, para diversos modelos (axissimétrico e plano [com e sem interface]). O segundo envolve a interpolação da curva de deslocamentos correspondente a uma modelação axissimétrica com interface. É importante salientar que o tipo de modelação que se pretende interpolar não é possível de ser realizada com o auxílio do Phase², uma vez que, o *software* não permite a colocação de interfaces em modelos axissimétricos. Assim, as modelações em estado plano funcionaram como um artifício que nos permite alcançar o nosso objetivo.

A curva teórica correspondente ao modelo axissimétrico com interface será determinada tendo em mente que o comportamento da mesma terá um andamento semelhante ao que se verifica nos resultados do estado plano com interface. Deste modo, podemos estabelecer as seguintes relações:

$$\frac{\text{Axissimétrico}}{\text{Axissimétrico (com interface)}} = \frac{\text{Plano (sem interface)}}{\text{Plano (com interface)}} \quad (3.1)$$

Tendo em conta que o que pretendemos obter são os deslocamentos da modelação axissimétrica com interface, temos que a mesma poderá ser obtida do seguinte modo:

$$\text{Axissimétrico (com interface)} = \frac{\text{Axissimétrico} \times \text{Plano (com interface)}}{\text{Plano (sem interface)}} \quad (3.2)$$

Apesar de só terem sido focados os deslocamentos, esta expressão é válida para qualquer resultado (tensões normais e tangenciais, por exemplo) que queiramos interpolar para o modelo axissimétrico com interface.

3.3.1. CASO DE ESTUDO 1

Este primeiro caso tem como objetivo concluir qual a melhor solução a ser aplicada em obra. Deste modo, para a modelação axissimétrica, pretende-se adquirir alguma sensibilidade quanto às tensões instaladas na superfície de contacto entre o rolhão e o maciço, com o objetivo de encontrar a solução mais equilibrada. Não nos devemos esquecer que estas tensões são obtidas tendo em consideração o estado de tensão inicial, ou seja, têm por base a Etapa1.

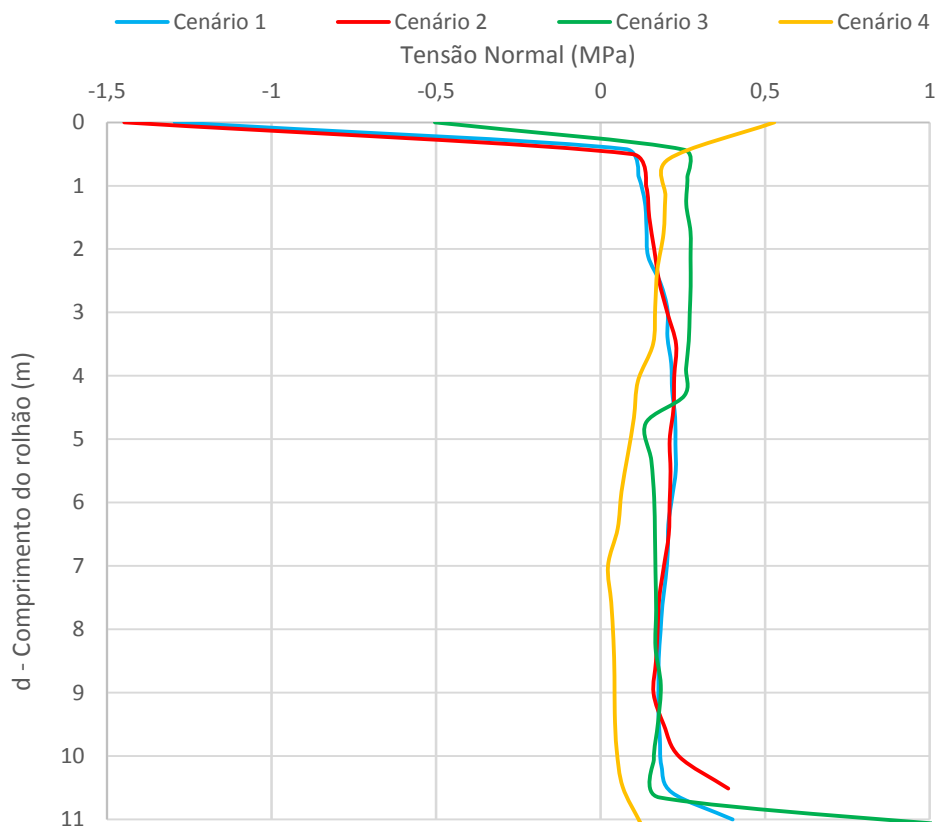


Fig.3.12 Tensão Normal.

No que respeita às tensões normais (Fig.3.12) podemos concluir, pela observação do gráfico, que os Cenários 1 e 2 apresentam um desenvolvimento muito semelhante. Ambas as curvas partem de uma situação de tração no início do contacto maciço/betão, com um valor a rondar os 1,5MPa, e crescem até aproximadamente aos 3,5m de comprimento do rolhão. A partir desse ponto o valor da tensão normal nestes dois casos estabiliza, rondando os 0,20MPa.

O Cenário 3 também parte de uma situação de tração sendo o valor inicial do gráfico sensivelmente de 0,5MPa. Verifica-se que entre os 0,5 e os 4,5m de comprimento do rolhão o mesmo apresenta uma tensão normal de compressão atingido como valor médio de 0,25MPa. É possível constatar que a partir dos 4,5m a tensão normal sofre uma diminuição brusca, passando a ter um valor médio de 0,15MPa.

Por último, no quarto cenário constata-se que a tensão normal apresenta-se com valor positivo nos primeiros 7m do rolhão e passa a ser praticamente constante no restante comprimento. O valor máximo registado é de 0.5MPa á compressão, logo no início do rolhão. Já nos últimos 4 metros, zona praticamente constante do gráfico, verifica-se um valor médio da tensão normal de 0.04MPa. Sendo este último valor tão baixo indicia que, neste caso, a tensão normal a partir dos 7 metros de comprimento do rolhão deixa de ser mobilizada.

Tendo presente a geometria dos rolhões podemos estabelecer um paralelismo entre a tensão normal e a sua geometria. Verifica-se que quando a zona de interface entre o rolhão e o maciço se desenvolve linearmente e de uma forma constante, a tensão normal mobilizada apresenta também um desenvolvimento regular. Já quando a geometria apresenta uma quebra, no Cenário 3 aos 4.5m e no Cenário 4 aos 7m, o desenvolvimento da curva de tensão apresenta quebras exatamente nesses mesmos pontos.

Passando à análise da tensão tangencial (Fig.3.13) podemos concluir que a sua mobilização ocorre de forma mais acentuada nos três primeiros cenários.

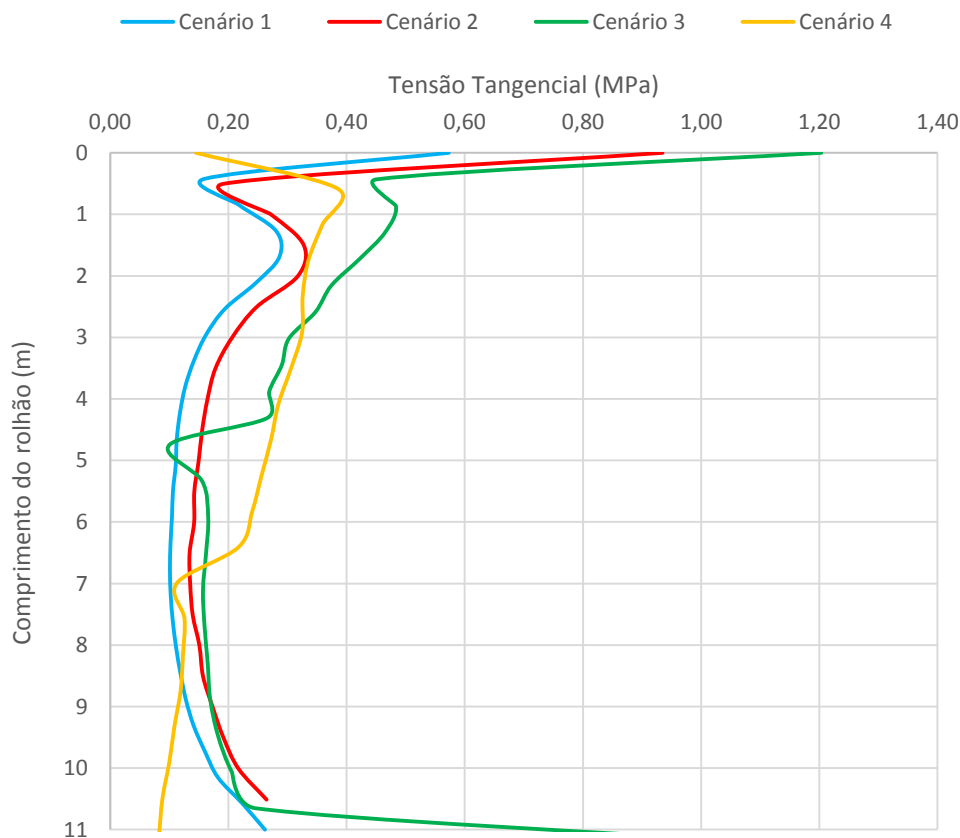


Fig.3.13 Tensão tangencial.

Analisando cada cenário, temos que o primeiro e o segundo apresentam, tal como na tensão normal, um desenvolvimento semelhante. O Cenário 1 apresenta como valor máximo, aproximadamente, 0.60MPa logo no início do rolhão. Já o valor máximo, no Cenário 2, ronda os 0.90MPa sendo ligeiramente superior ao anterior.

Por sua vez, o Cenário 3, é o que apresenta o maior valor nas tensões tangenciais. A curva inicia-se perto dos 1.20MPa, vai decrescendo progressivamente até aos 4.5m de comprimento do rolhão onde há uma quebra no seu valor. Após essa quebra, podemos considerar que o valor da tensão tangencial mantém-se praticamente constante, tomando um valor médio de 0.16MPa.

Em último lugar vem a análise do Cenário 4, é possível constatar que o valor máximo de tensão ronda os 0.4MPa e que posteriormente a esse pico decresce de forma contínua. Entre os 6 e os 7m, do comprimento do rolhão, verifica-se uma quebra acentuada no valor da tensão, passando a partir da mesma a registarem-se valores dentro do intervalo [0.08; 0.12] MPa.

Desta análise de tensões podemos concluir que as mesmas são maioritariamente mobilizadas nos primeiros 5 metros, para os três primeiros cenários, e nos primeiros 7 metros, para o Cenário 4. Também é possível concluir, quando analisamos o intervalo de variação de tensões, que o Cenário 4 é o que apresenta o menor intervalo.

Assim, verifica-se que o Cenário 4 é o que apresenta melhores resultados, uma vez que quando analisamos, tanto as tensões normais como as tangenciais, é neste cenário que as mesmas variam um intervalo mais restrito e sempre com valores positivos. O facto de ter valores positivos dá-nos a indicação que de não há zonas do rolhão que estejam a sofrer efeitos de tração, o que é benéfico para o bom funcionamento do mesmo.

3.3.2. CASO DE ESTUDO 2

Neste estudo, pretende-se comprovar a influência do módulo de deformabilidade nos deslocamentos a que o rolhão está sujeito, para o modelo axissimétrico. Assim, para os Cenários 1 e 4, modelando o maciço com parâmetros obtidos no *software* RocLab, iremos proceder a 7 simulações onde se pretende variar o valor de E. O módulo de deformabilidade está compreendido num intervalo que vai desde os 10GPa até aos 40GPa, por incremento de 5GPa em cada simulação.

Nunca é de mais relembrar que nesta análise temos como referência a Etapa3, uma vez que pretendemos avaliar os deslocamentos induzidos pela aplicação das cargas no rolhão/macico, para os diversos valores de E.

Utilizando o *software* obtivemos as seguintes características para o maciço: ângulo de atrito (ϕ) igual a 65° , coesão (c) igual a 0.75MPa, um coeficiente de Poisson (ν) de 0.30 e, por último, uma resistência à tração de 0.100MPa.

O primeiro caso a ser simulado foi o Cenário 1, as imagens que se seguem representam os resultados obtidos (Fig.3.14 a Fig.3.16).

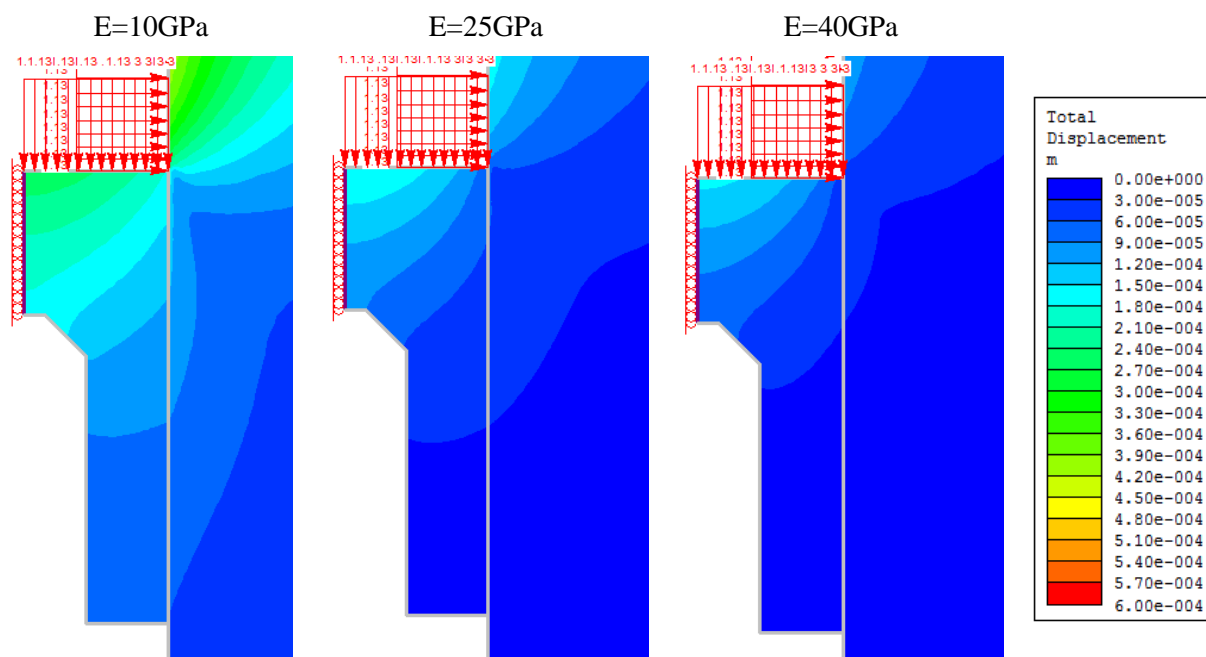


Fig.3.14 Deslocamentos totais para diversos valores do módulo de deformabilidade (E) - Cenário 1.

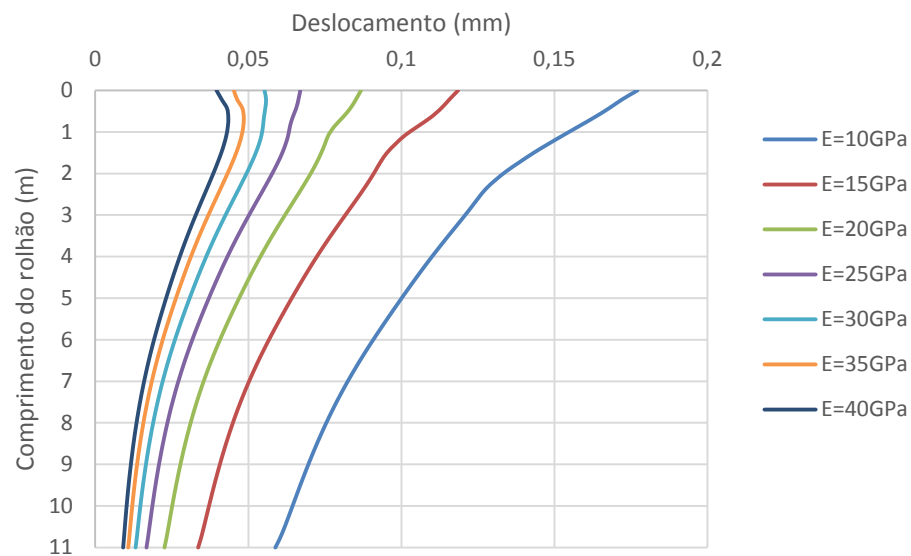


Fig.3.15 Gráfico dos deslocamentos para os diversos módulos de deformabilidade – Cenário 1.

Através dos gráficos verifica-se que à medida que o módulo de deformabilidade aumenta, correspondendo a um maciço com melhores características, os deslocamentos do rolhão diminuem. Por uma questão de curiosidade, avaliaram-se as zonas sujeitas a plastificação, tendo-se constado que o aumento de E fez com que a zona afetada diminui-se consideravelmente.

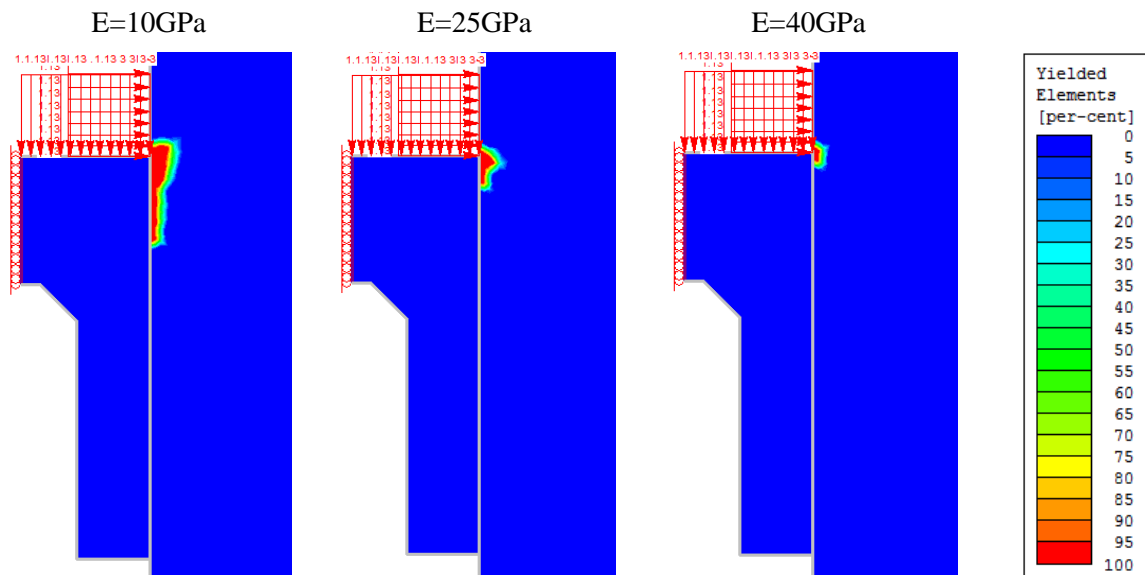


Fig.3.16 Zonas de plastificação para diferentes valores do módulo de deformabilidade (E) - Cenário 1.

Para o Cenário 4 as conclusões são em tudo semelhantes, a par do aumento do módulo de deformabilidade existe uma redução dos deslocamentos e das zonas de plastificação. As Fig.3.17 a Fig.3.19 corroboram esta conclusão.

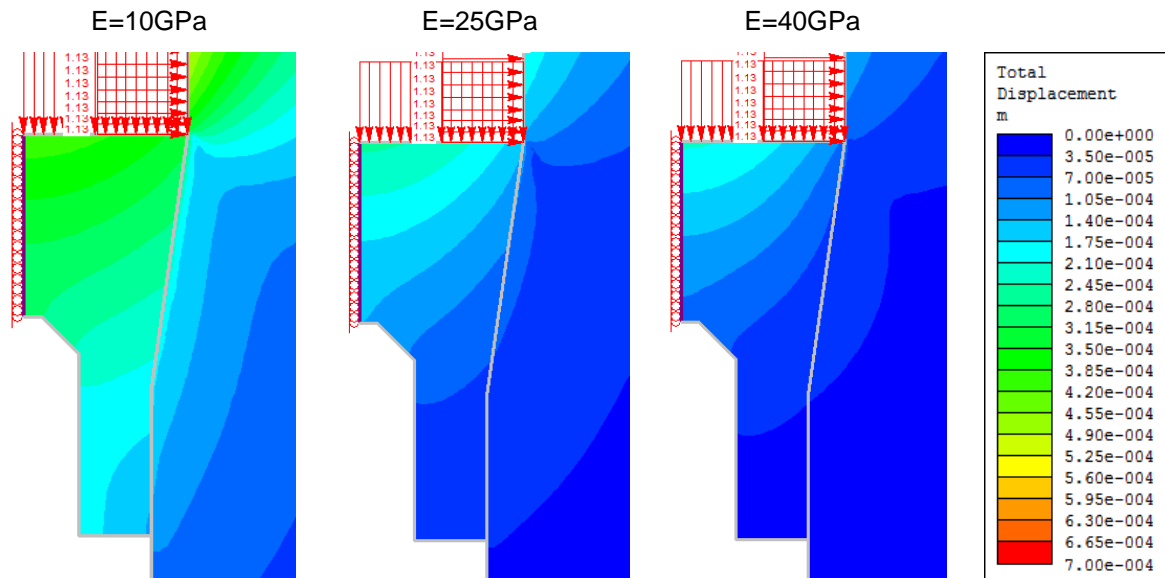


Fig.3.17 Deslocamentos totais para diferentes valores do módulo de deformabilidade (E) - Cenário 4.

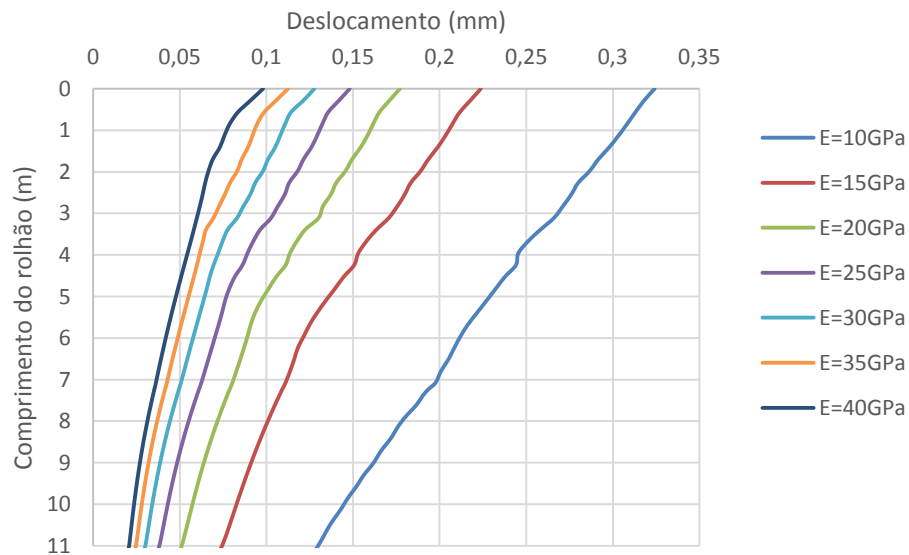


Fig.3.18 Gráfico dos deslocamentos - Cenário 4.

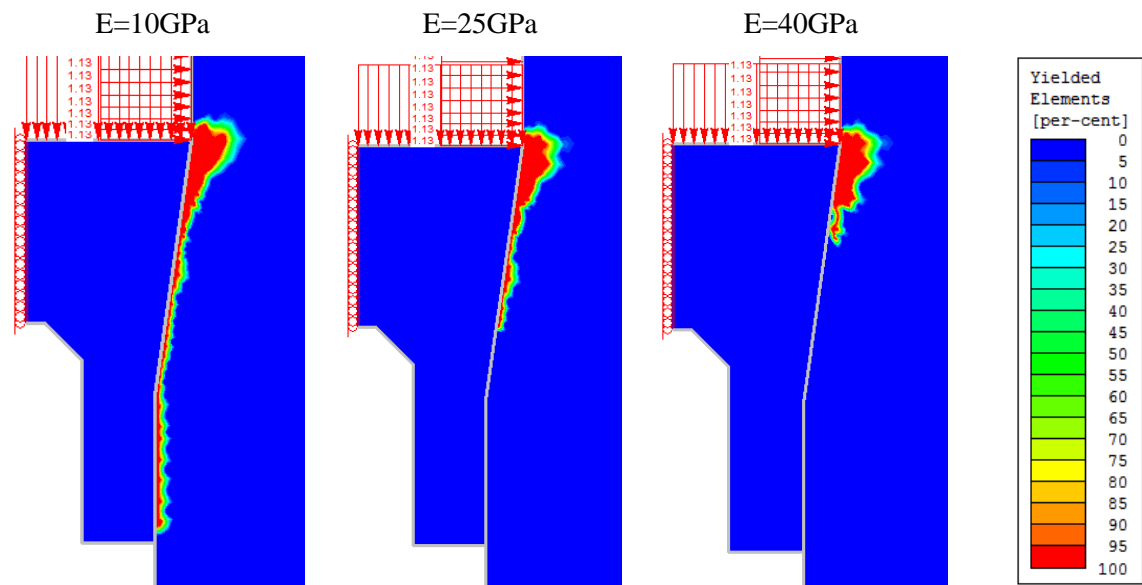


Fig.3.19 Zonas de plastificação para diferentes valores do módulo de deformabilidade (E) - Cenário 4.

3.3.3. CASO DE ESTUDO 3

Pretende-se analisar a influência da construção de uma gola, que tem por objetivo diminuir as zonas tracionadas e plastificadas. Essa gola é materializada através de um bloco de betão com 0,8m de largura e 2m de comprimento, construído a montante do rolhão. As características do betão adotado estão em conformidade com as referidas no tópico 3.2.1.

Deste modo, para duas geometrias aleatórias em modelo axissimétrico, irão ser analisados os acréscimos nas tensões principais máxima e mínima ($\Delta\sigma_1$ e $\Delta\sigma_3$ respetivamente), assim como, as zonas sujeitas a plastificação. Com este efeito, a Etapa3 será o ponto de referência para esta análise. De seguida serão apresentados os resultados correspondentes ao Cenário 2 (Fig.3.20 a Fig.3.22).

Da observação da Fig.3.20, podemos reconhecer que houve uma translação da mancha corresponde à zona mais tracionada. No primeiro caso, o que não tem gola, a zona mais tracionada encontra-se no vértice mais a montante da zona de contacto entre o rolhão e o maciço. Já no segundo, o que tem a gola, verifica-se que a zona mais tracionada deixou de estar localizada no maciço encontrando-se agora no encontro da gola com o rolhão. O seu desenvolvimento é menos extenso que no primeiro caso, no entanto, o valor da tração é ligeiramente superior (0.15MPa sem gola e 0.60MPa com gola).

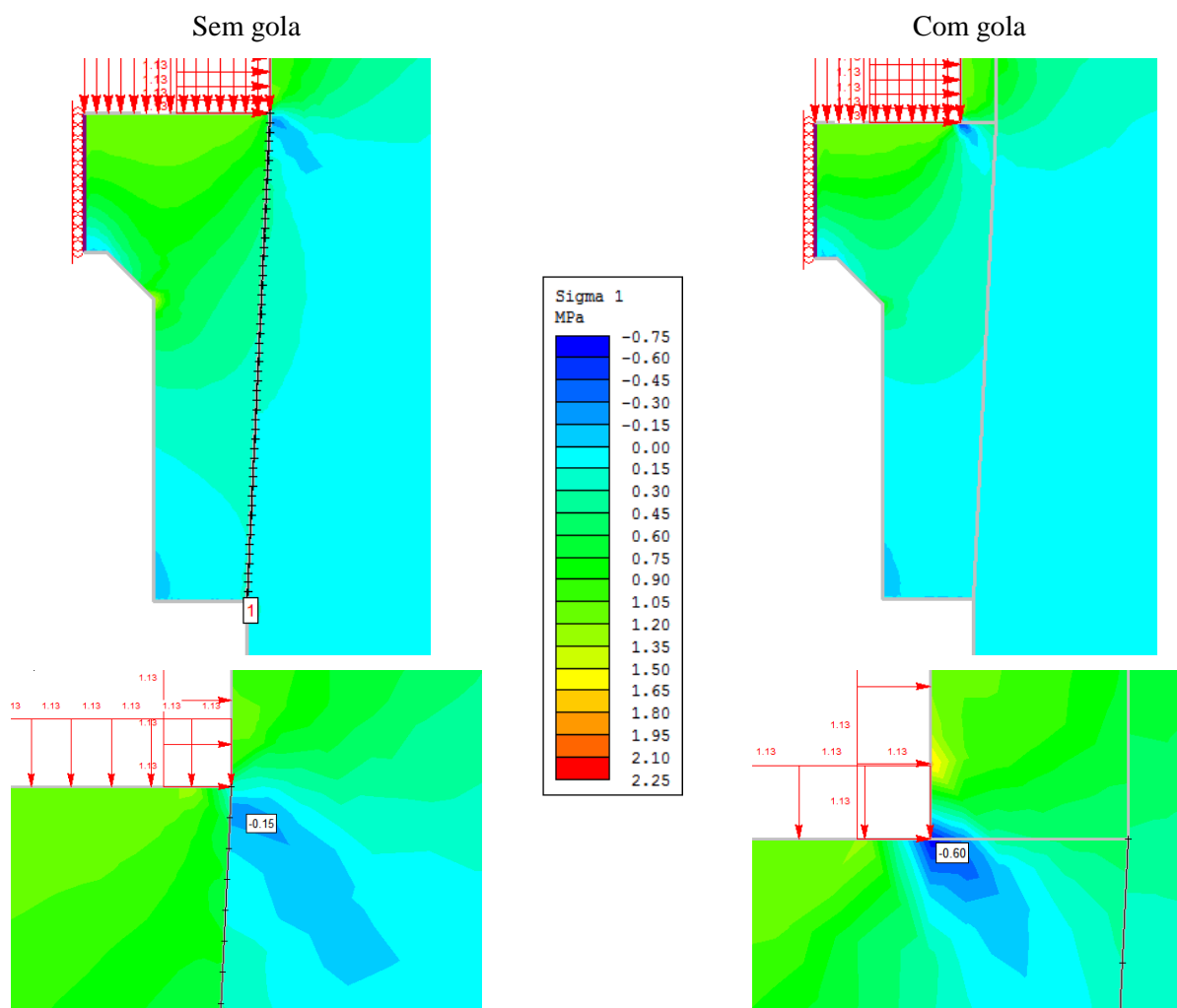


Fig.3.20 Acréscimo da tensão principal máxima e pormenor da mesma - Cenário 2 com e sem gola.

Quanto a $\Delta\sigma_3$ (Fig.3.21), tensão principal mínima, a zona mais tracionada encontra-se no vértice mais a montante da interface maciço-rolhão. Tendo em conta, que em $\Delta\sigma_1$, este mesmo vértice é o que apresenta maior valor de tração podemos concluir que é um ponto crítico. Novamente, a gola faz com que haja um deslocamento da zona tracionada, e um aumento do valor da tração, de 3.90MPa para 4.20MPa.

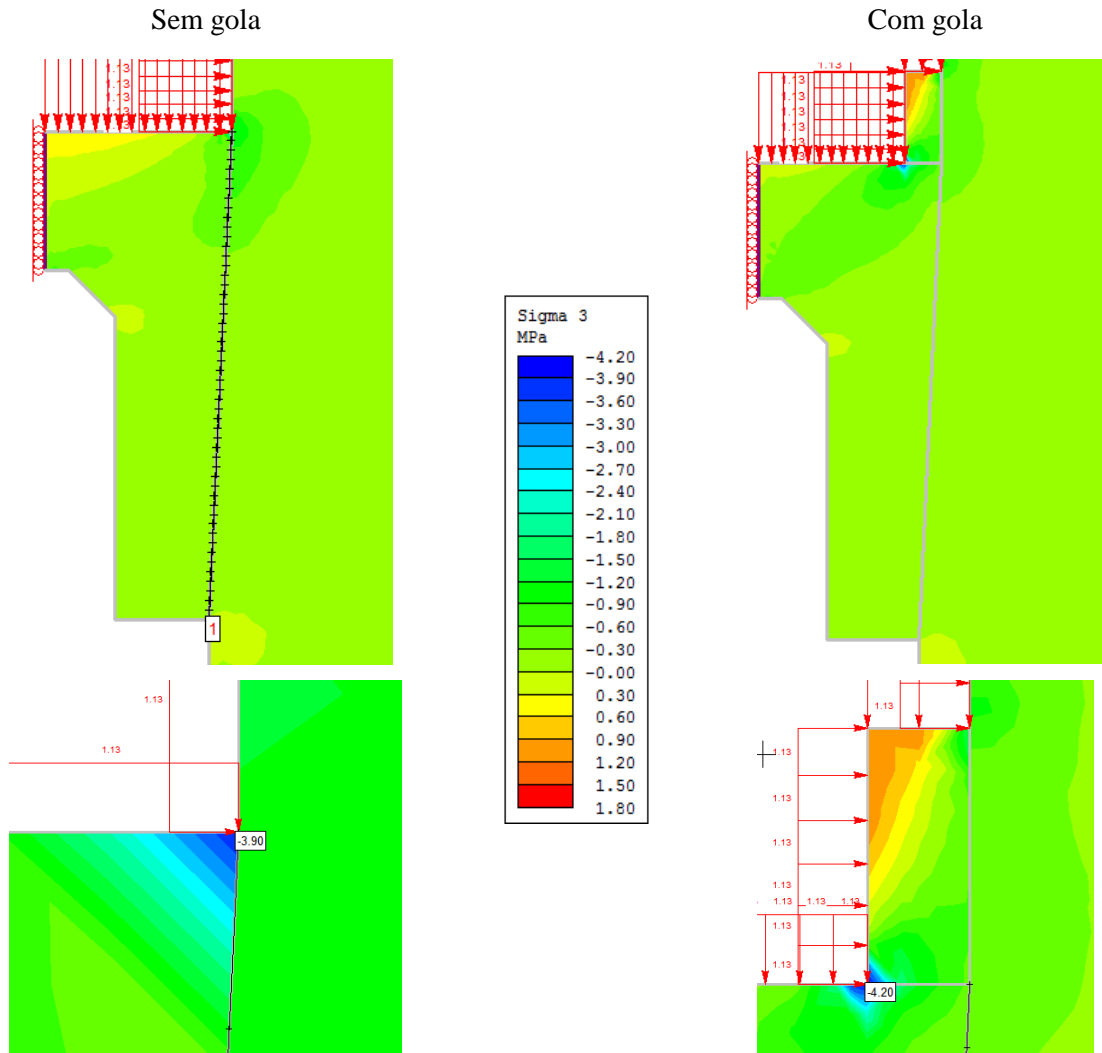


Fig.3.21 Acréscimo da tensão principal mínima e pormenor da mesma - Cenário 2 com e sem gola.

Por fim, analisando a plastificação do Cenário 2 (Fig.3.22) nota-se que no caso de termos a gola, a plastificação do maciço é consideravelmente reduzida e encontra-se mais localizada.

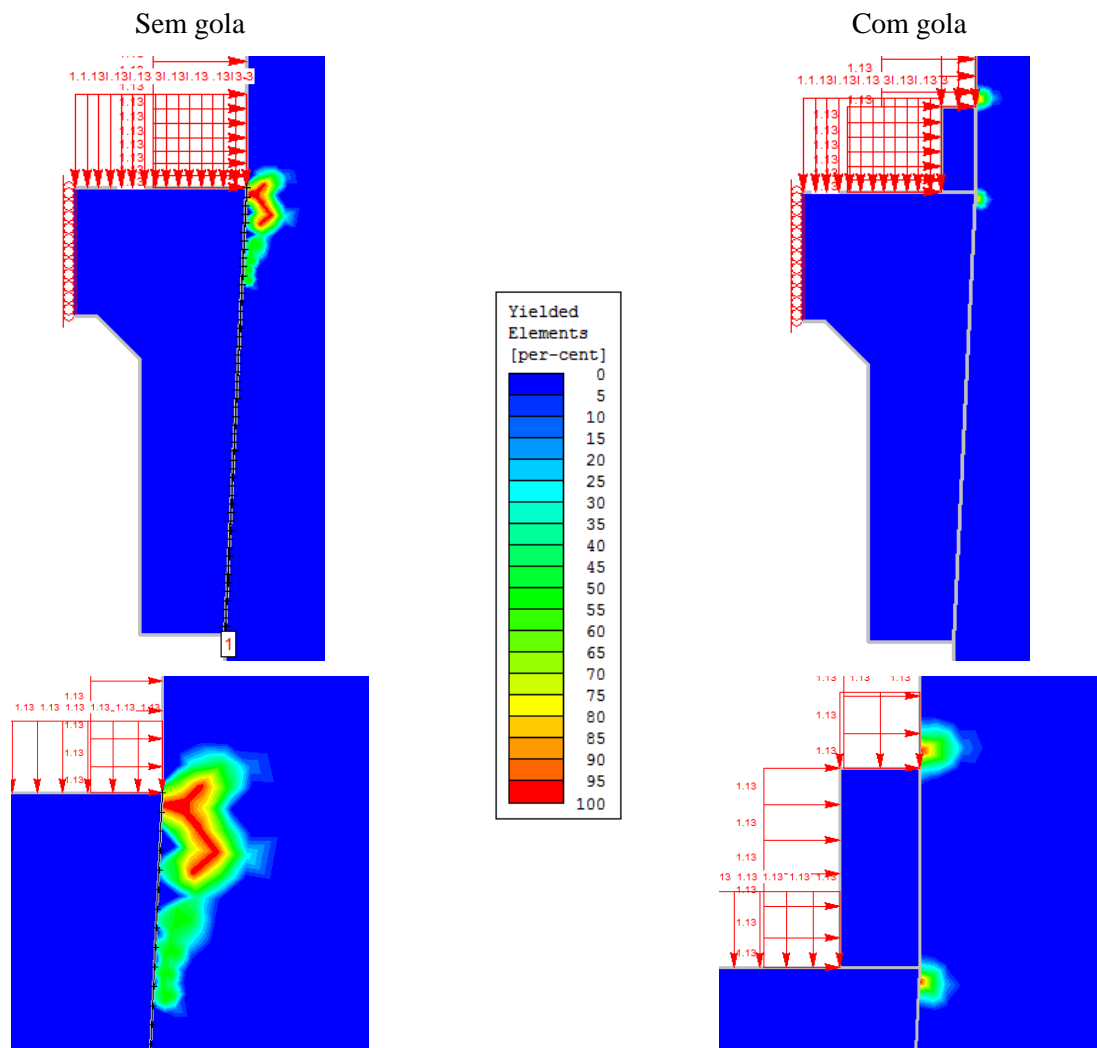


Fig.3.22 Zona de plastificação e pormenor - Cenário 2 com e sem gola.

O outro cenário, aleatoriamente escolhido, foi o Cenário 3. As figuras que se seguem representam os resultados obtidos (Fig.3.23 a Fig.3.25).

Analisando $\Delta\sigma_1$ e $\Delta\sigma_3$, podemos chegar a conclusões semelhantes às do cenário anterior. A zona tracionada, com a construção da gola, foi transferida para o ponto de encontro do rolhão com a gola afastando-se, mais uma vez, do maciço.

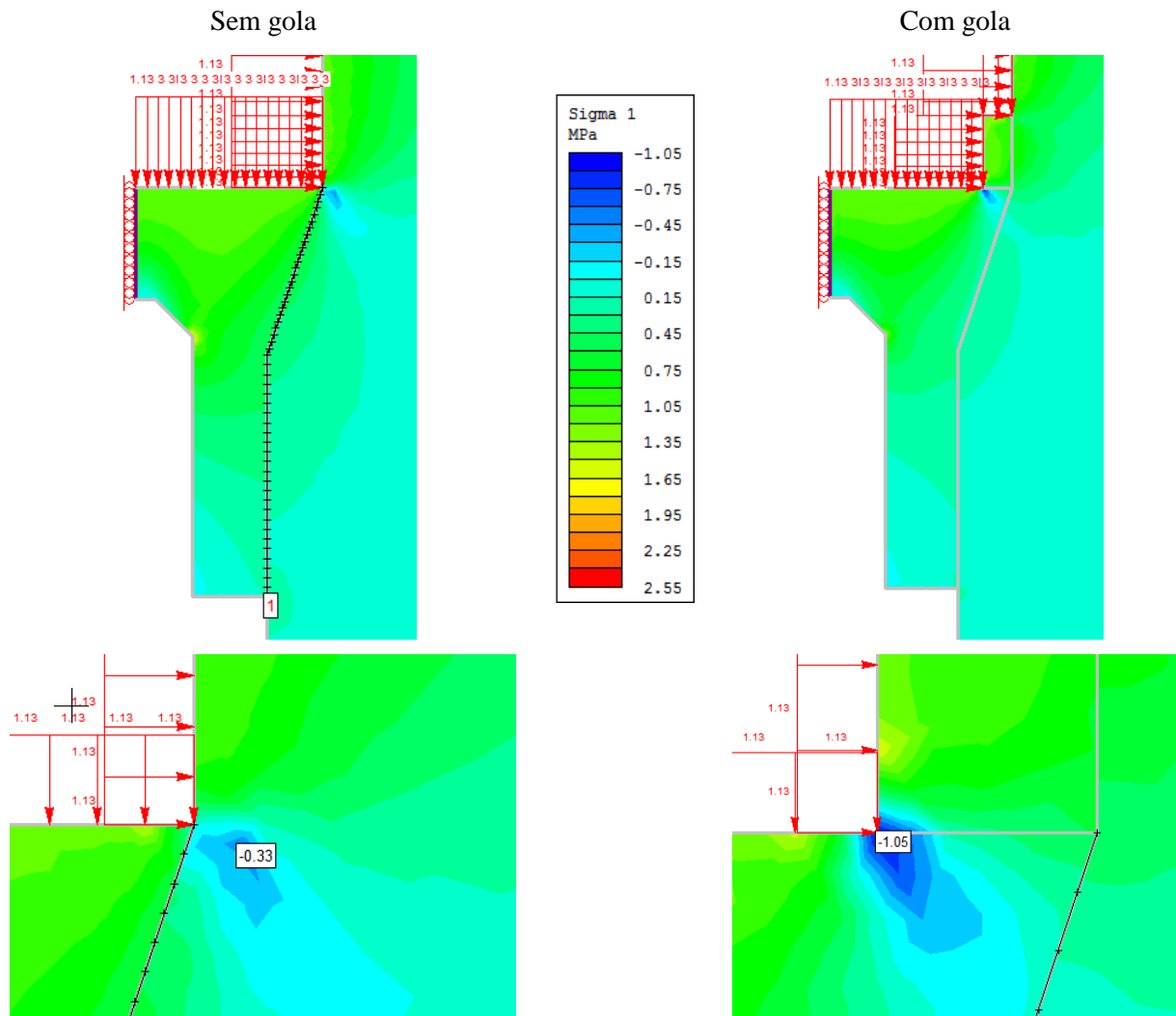


Fig.3.23 Acréscimo da tensão principal máxima e pormenor da mesma - Cenário 3 com e sem gola.

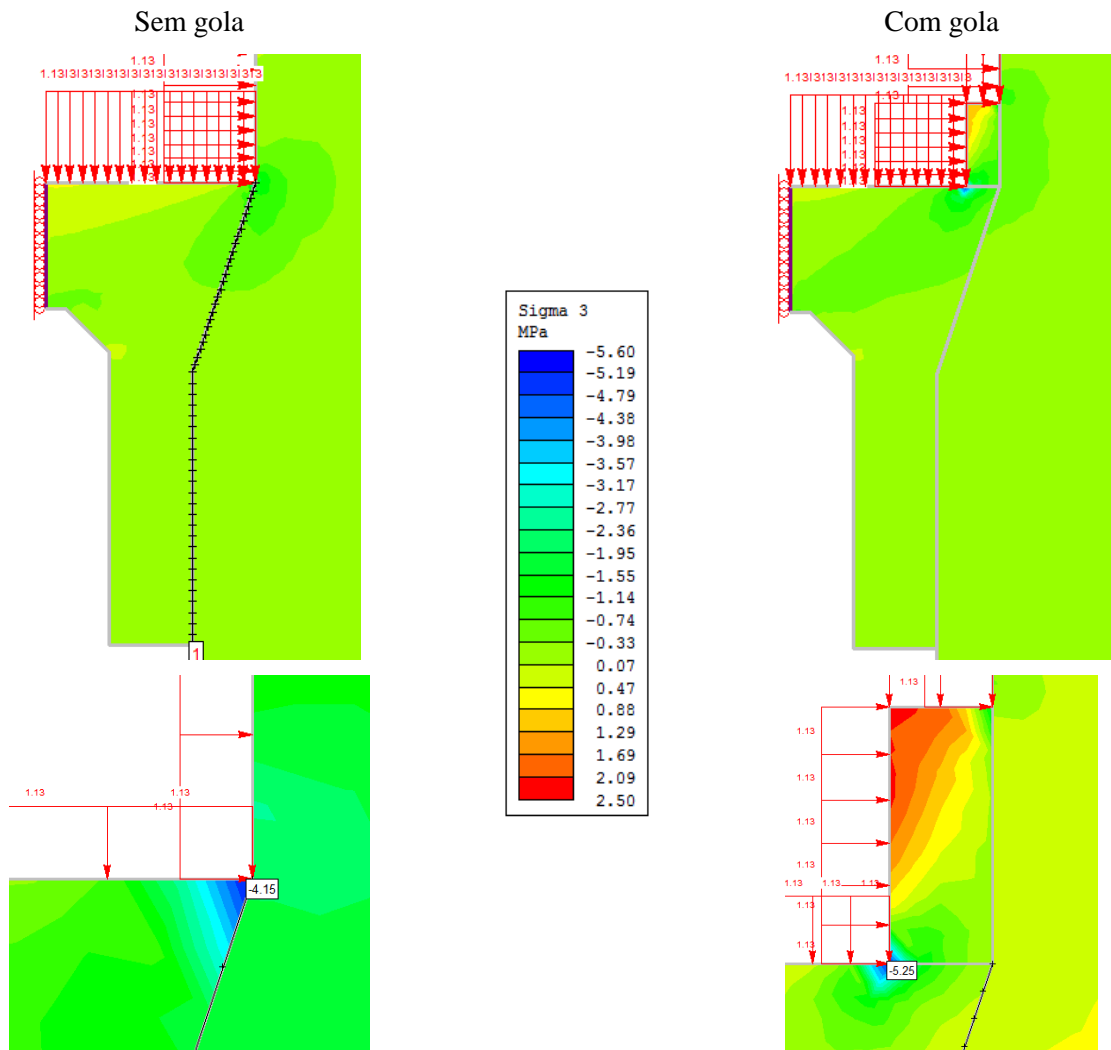


Fig.3.24 Acréscimo da tensão principal mínima e pormenor da mesma - Cenário 3 com e sem gola.

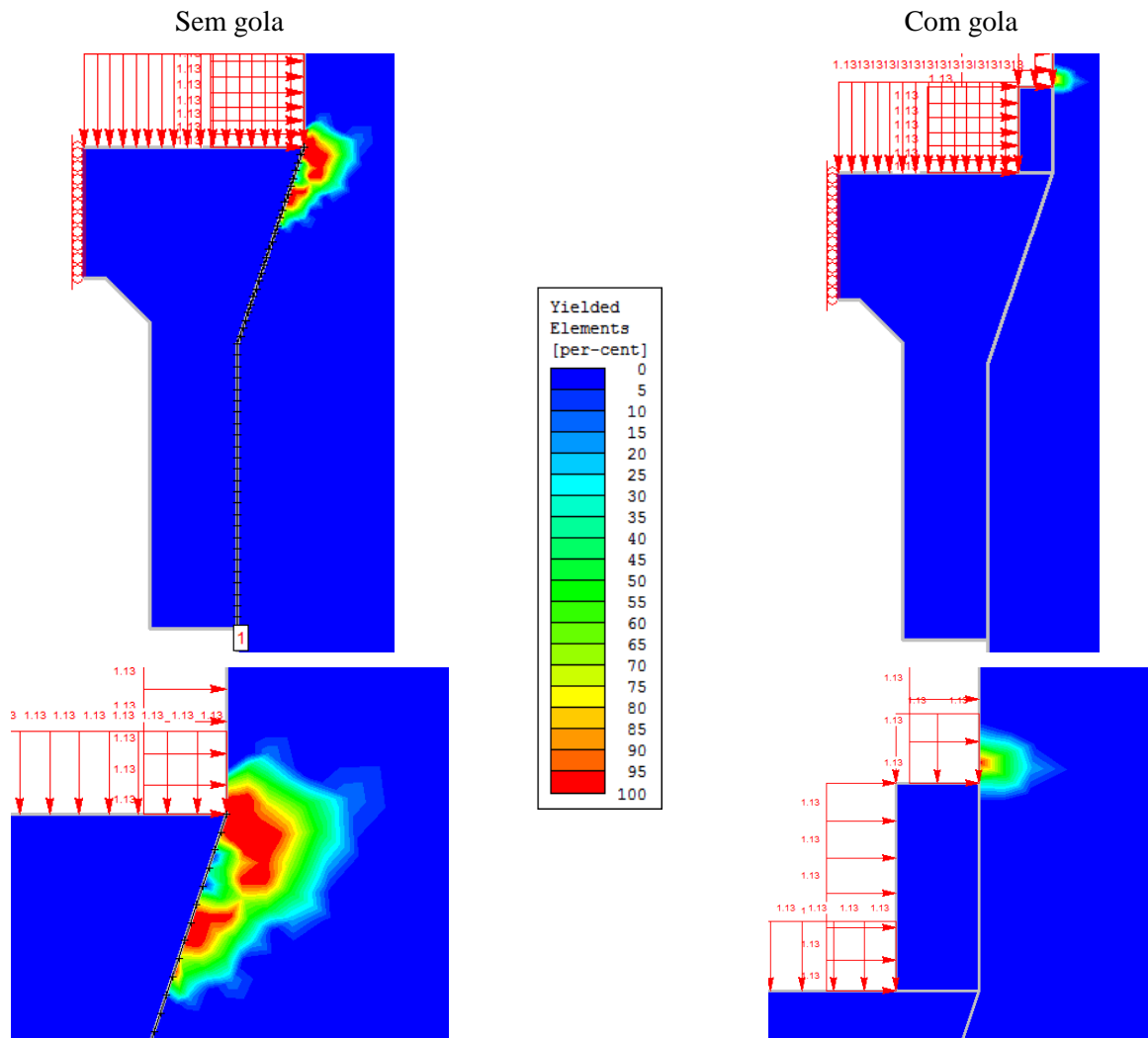


Fig.3.25 Zona de plastificação e pormenor - Cenário 3 com e sem gola.

Quando analisada a zona de plastificação (Fig.3.25), a mesma mostra-se concentrada no mesmo vértice que as tensões e abrange uma área considerável. Com a construção da gola, esta zona é significativamente reduzida e é deslocada para montante.

Um outro aspeto que é interessante abordar, relaciona-se com o efeito da gola nas tensões normais e tangenciais. Assim, para cada cenário determinaram-se estas curvas de tensões. Como se pretende analisar as tensões ao longo da fronteira de contacto entre o rolhão e o maciço, temos de ter em conta o estado de tensão inicial, deste modo, o ponto de referencia para esta análise é a Etapa1.

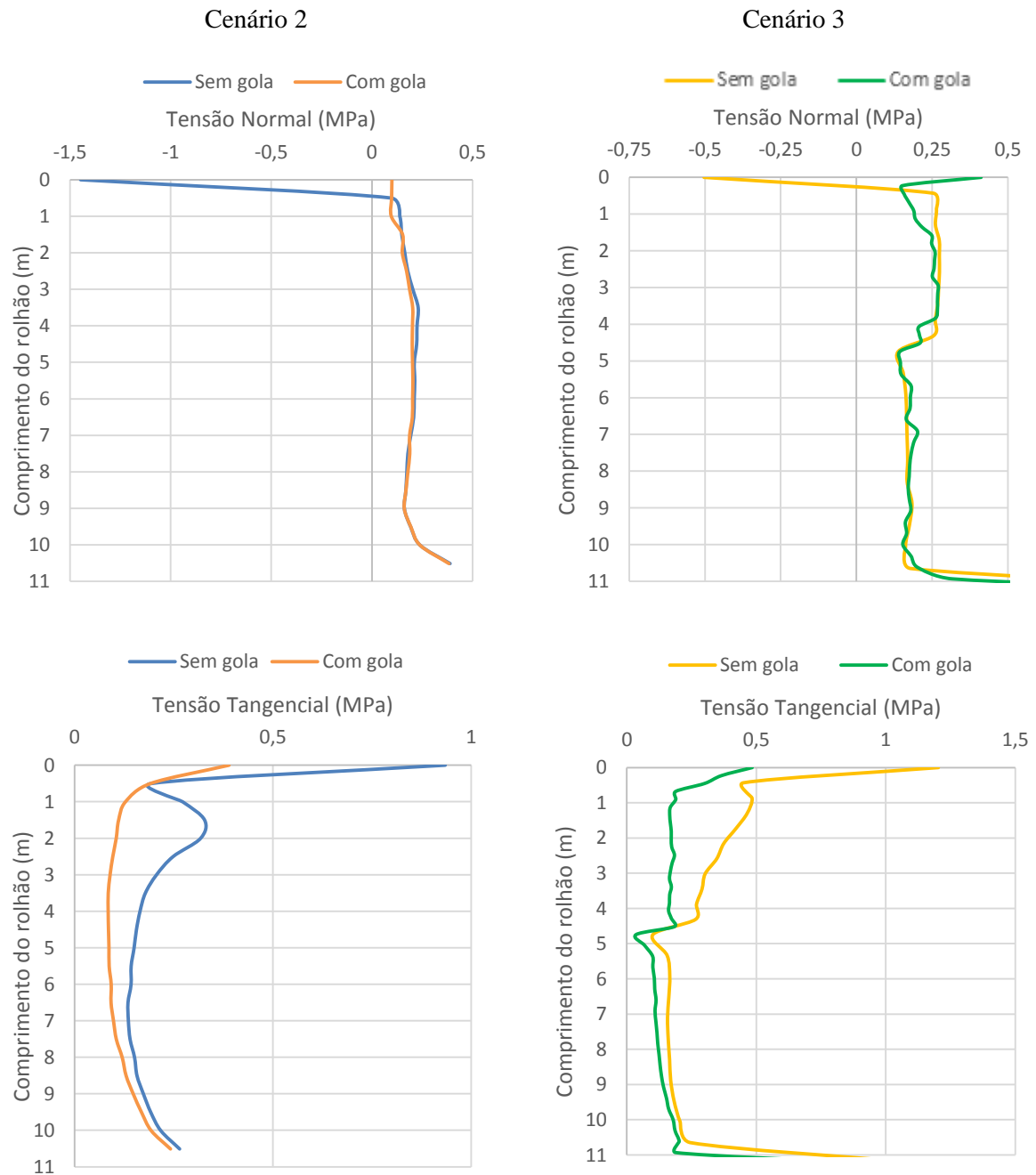


Fig.3.26 Efeito da gola nas tensões normais e tangenciais.

Da observação dos gráficos podemos constatar que a construção da gola faz com que haja uma redução significativa das tensões normais e tangenciais.

Através desta pequena análise, podemos concluir que a construção da gola torna-se benéfica para o bom funcionamento do rolhão. Os resultados mostram uma diminuição das zonas plastificadas apesar de um ligeiro aumento das zonas tracionadas no rolhão. Também mostram que o valor máximo das tensões também diminui significativamente.

Quanto ao problema que o incremento de trações induz no betão, ou seja, as implicações na sua fendilhação, a solução poderá de ser resolvida com um reforço de armaduras nesta zona. A gola cumpre assim o objetivo para o qual foi concebida.

Devido ao facto de se verificar aquele ligeiro incremento no encontro do rolhão com a gola, fica como sugestão a construção de um chanfre com o objetivo de atenuar a acção das forças aplicadas naquele ponto. Na Fig.3.27 consta um exemplo de aplicação de um chanfre e na Fig.3.28 os resultados obtidos.

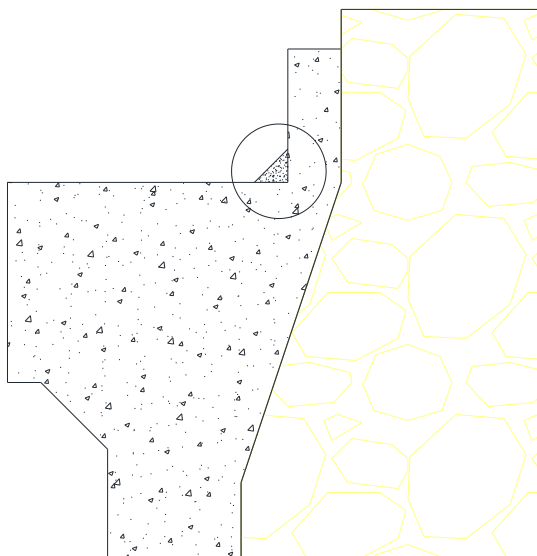


Fig.3.27 Pormenor do rolhão com a construção de um chanfre.

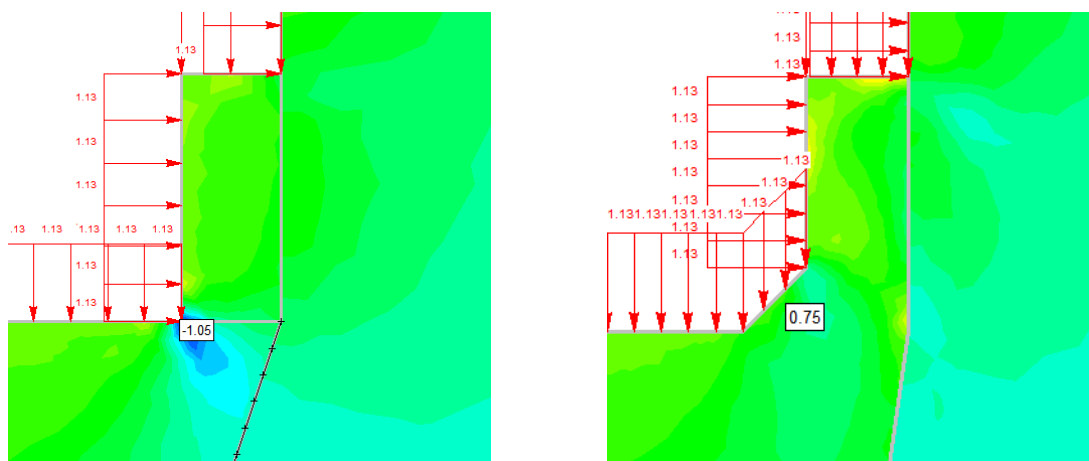


Fig.3.28 Comparação do acréscimo da tensão principal máxima sem chanfre (esquerda) e com chanfre (direita).

3.3.4. CASO DE ESTUDO 4

Por último, a quarta análise recai sobre o estudo individual de cada cenário geométrico e terá dois objetivos. No primeiro, pretende-se estudar o comportamento relativo, no que respeita ao valor dos deslocamentos, para diferentes tipos de análise (axissimétrica e plana [sem e com interface]). Já no segundo, propomo-nos realizar uma interpolação para determinar a curva teórica correspondente a um modelo axissimétrico com interface. É importante relembrar que o tipo de análise que pretendemos interpolar, axissimétrica com interface, não é possível de ser realizada no Phase², constituindo assim uma limitação do programa. Para a determinação da curva, os resultados em estado plano funcionaram como um artifício. Esta análise terá como ponto de referência a Etapa3.

3.3.4.1. Cenário 1

O primeiro passo nesta análise consiste em apresentar os resultados obtidos para os deslocamentos nas três modelações (Fig.3.29 a Fig.3.31):

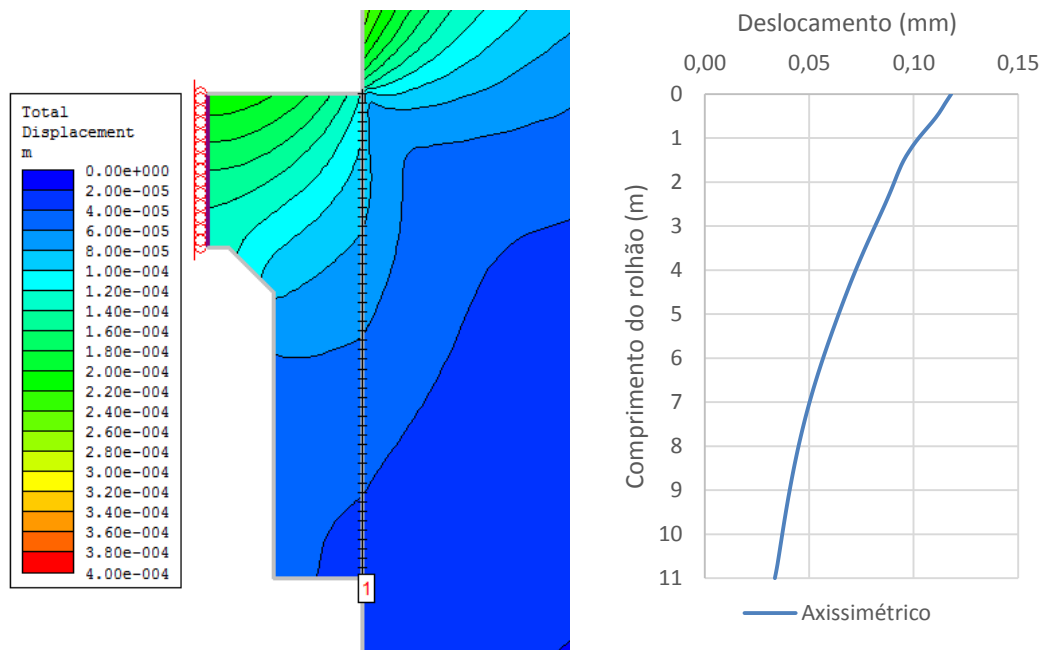


Fig.3.29 Deslocamento totais para o caso axissimétrico – Cenário 1.

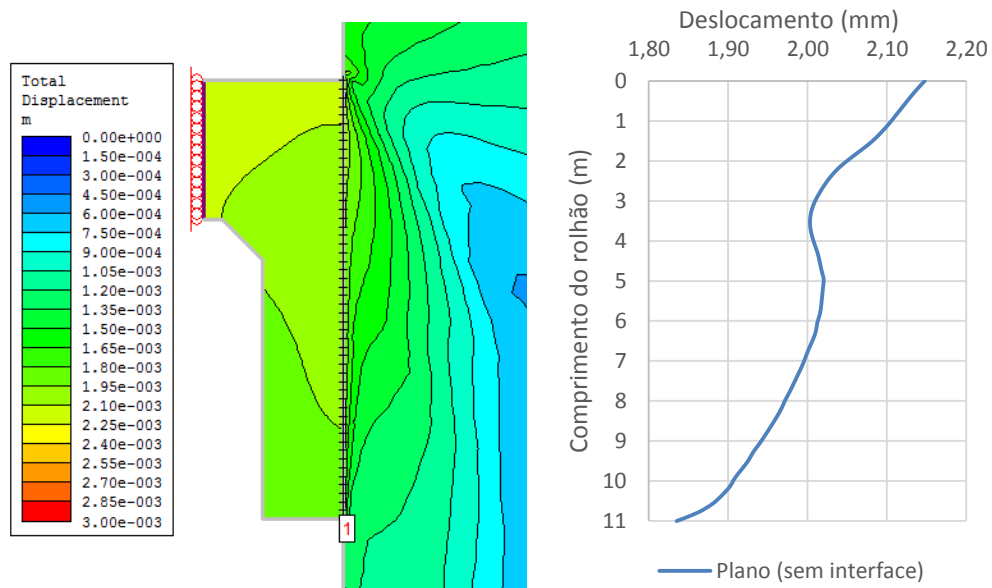


Fig.3.30 Deslocamento totais para o caso estado plano sem interface – Cenário 1.

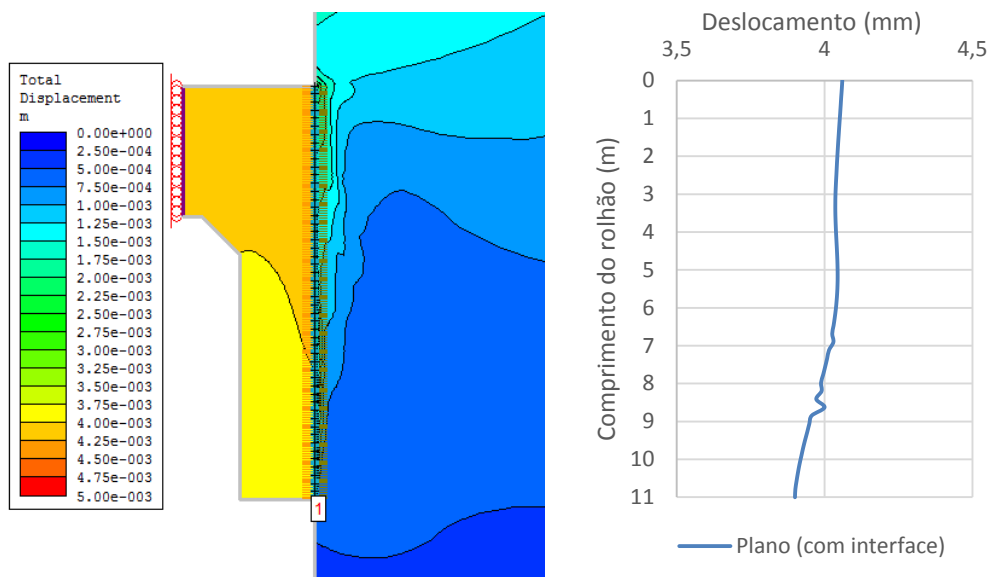


Fig.3.31 Deslocamento totais para o caso estado plano com interface – Cenário 1.

A análise dos gráficos permite concluir que as curvas dos deslocamentos no modelo axissimétrico e no modelo plano com interface apresentam um desenvolvimento linear, ao contrário do que se verifica no modelo plano sem interface. Este último modelo, apresenta uma mudança de tendência aproximadamente aos 3.5m, coincidindo com o início da quebra interior na geometria do rolhão.

O quadro que se segue sintetiza os deslocamentos máximos e mínimos verificados:

Quadro 3.3 Deslocamentos máximos e mínimos – Cenário 1.

	Deslocamento máximo	Deslocamentos mínimos
Axissimétrico	0.12 mm	0.03 mm
Plano (sem interface)	2.15 mm	1.84 mm
Plano (com interface)	4.06 mm	3.90 mm

Analisando os resultados obtidos, podemos concluir que os deslocamentos máximos ocorrem na face de montante do rolhão, onde a carga é aplicada. Existe uma tendência, em todas as modelações, para que o valor do deslocamento diminua à medida que percorremos o rolhão na direção de jusante (Fig.3.29 a Fig.3.31). Dentro destas três simulações a do plano com interface é a que apresenta os maiores valores de deslocamentos máximo e mínimo.

Comparando a modelação axissimétrica com a modelação em estado plano sem interface e recorrendo à razão, $\frac{\text{Deslocamento-Plano (sem interface)}}{\text{Deslocamento-Axissimétrico}}$, podemos verificar que os deslocamentos no estado plano são 18 a 60 vezes superiores aos do modelo axissimétrico. Esta diferença aumenta no sentido em que caminhamos para a zona de jusante do rolhão.

Focando apenas as modelações em estado plano (Fig.3.30 e Fig.3.31), pretendemos analisar a influência da modelação da interface. Assim, é possível constatar que os deslocamentos, neste tipo de simulação, maioritariamente duplicam, levando-nos concluir que a interface influencia os deslocamentos.

Uma vez que a forma de obtenção da curva teórica do modelo axissimétrico com interface já foi explicitada na introdução ao caso de estudo, apenas se apresenta o gráfico resultante da aplicação da expressão 3.2. (curva a amarelo):

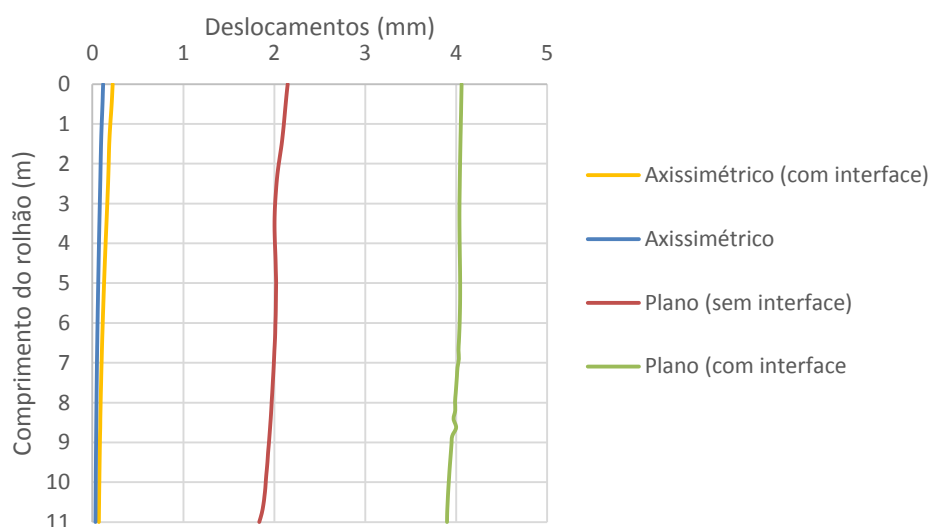


Fig.3.32 Curvas dos deslocamentos totais.

3.3.4.2 Cenário 2

Seguindo o estilo de análise efetuada no caso anterior, segue-se a apresentação dos resultados deste cenário geométrico (Fig.3.33 a Fig.3.35):

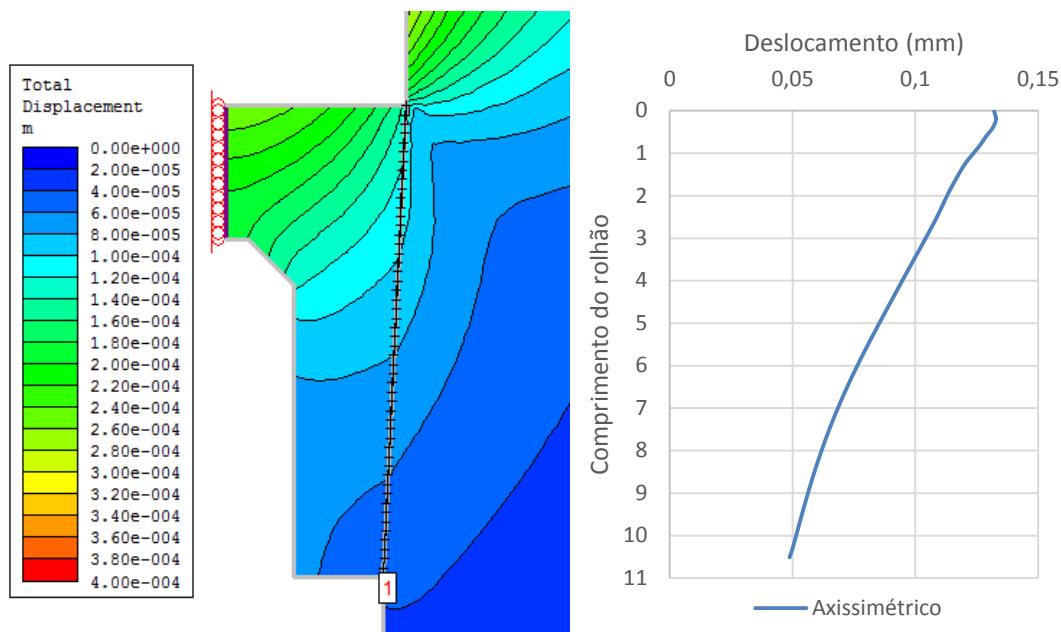


Fig.3.33 Deslocamentos totais para o caso axissimétrico- Cenário2.

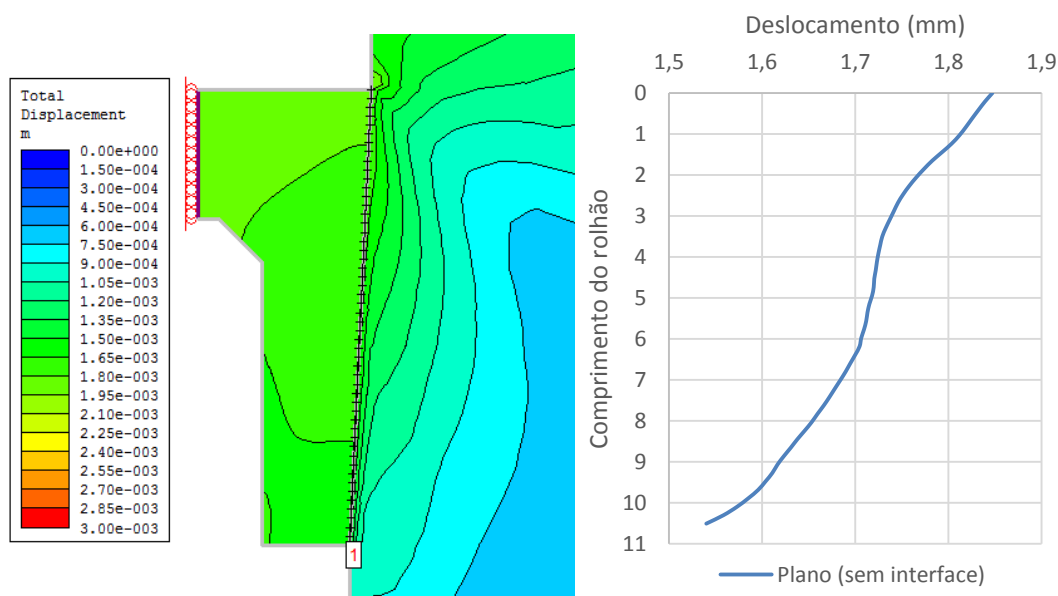


Fig.3.34 Deslocamentos totais para o caso estado plano sem interface - Cenário 2.

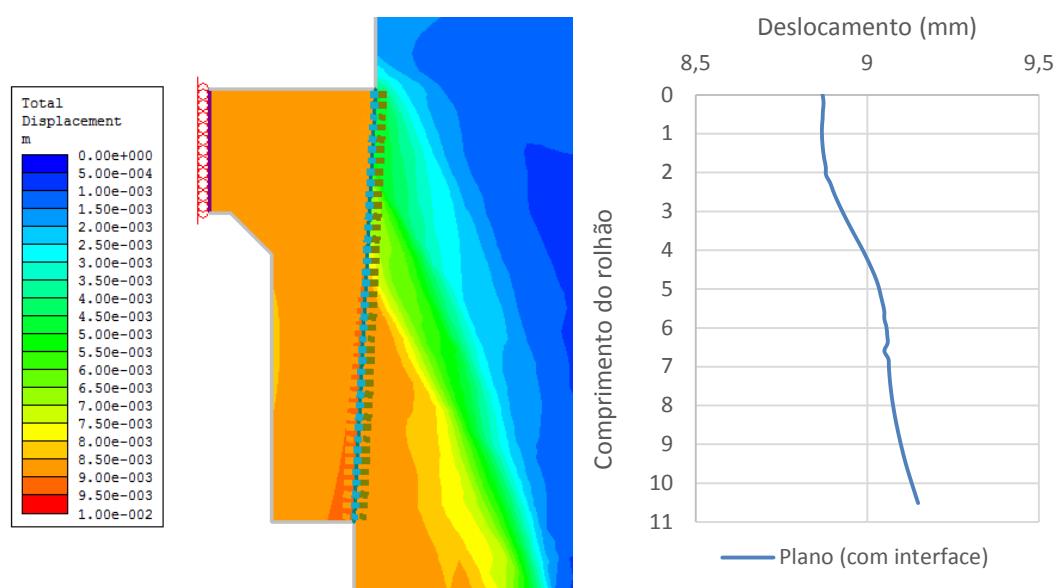


Fig.3.35 Deslocamentos totais para o caso estado plano com interface - Cenário 2.

No Cenário 2 não encontramos semelhanças evidentes entre os desenvolvimentos dos gráficos. No entanto, nesta segunda análise verifica-se, tal como no Cenário 1, que os deslocamentos máximos ocorrem na face de montante do rolhão, excetuando na modelação em estado plano com interface onde o mesmo ocorre no ponto mais a jusante (Fig.3.33 a Fig.3.35). O último gráfico (Fig.3.35) representa mesmo um caso particular da evolução dos deslocamentos, uma vez que se verifica um aumento gradual dos valores ao longo do desenvolvimento do rolhão e não a sua redução, como seria de esperar.

O quadro que se segue sintetiza os deslocamentos máximos e mínimos verificados:

Quadro 3.4 Deslocamentos máximos e mínimos - Cenário 2.

	Deslocamento máximo	Deslocamentos mínimos
Axissimétrico	0.13 mm	0.05 mm
Plano (sem interface)	1.85 mm	1.54 mm
Plano (com interface)	9.15 mm	8.87 mm

Comparando a modelação axissimétrica com a modelação em estado plano sem interface podemos concluir, analisando a razão $\frac{\text{Deslocamentos-Plano (sem interface)}}{\text{Deslocamentos-Axissimétrico}}$, que os deslocamentos no estado plano são 14 a 30 vezes superiores aos verificados no modelo axissimétrico.

Procedendo à análise do estado plano com interface, em comparação com o plano sem interface, podemos concluir que os deslocamentos do primeiro são aproximadamente 6 vezes superiores aos do segundo.

A curva teórica do modelo axissimétrico com interface irá ser determinada, tal como no caso anterior, tendo em conta a expressão 3.2. Deste modo, temos a amarelo, a curva teórica:

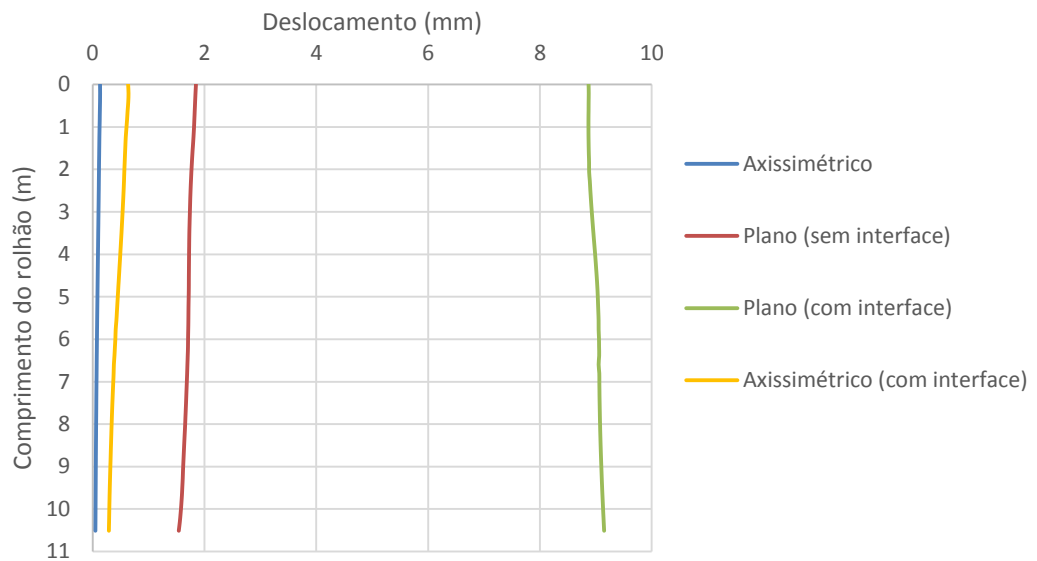


Fig.3.36 Deslocamentos totais - Cenário 2.

3.3.4.3 Cenário 3

Esta nova geometria não é tão linear como nos casos anteriores. Apresenta-se sobre a forma de uma rolha, contendo uma face que apresenta uma quebra acentuada. Esta nova secção possibilita a mobilização das duas componentes de resistência.

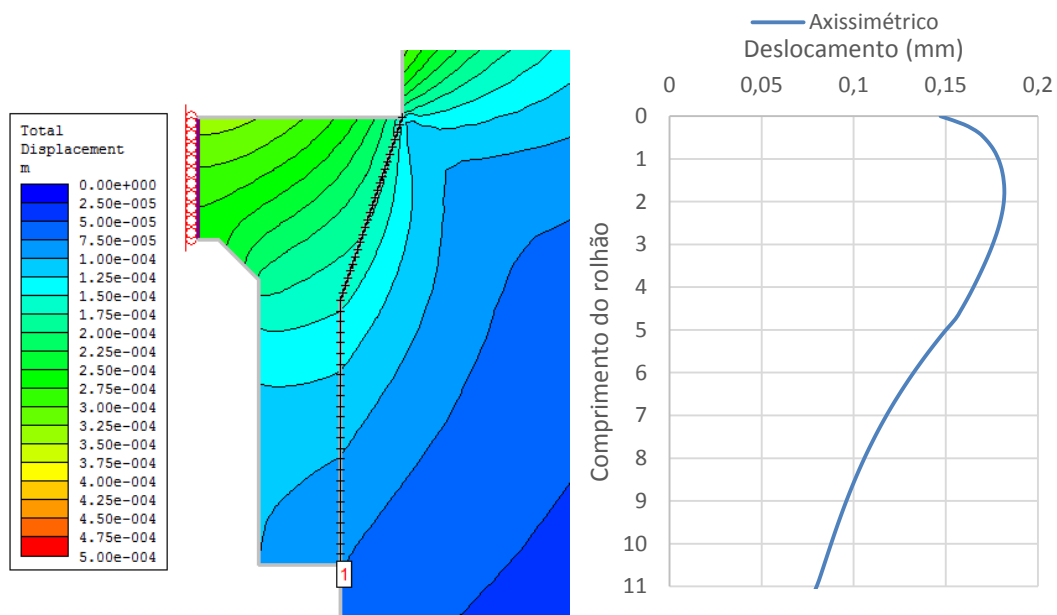


Fig.3.37 Deslocamentos totais para o caso axissimétrico – Cenário 3.

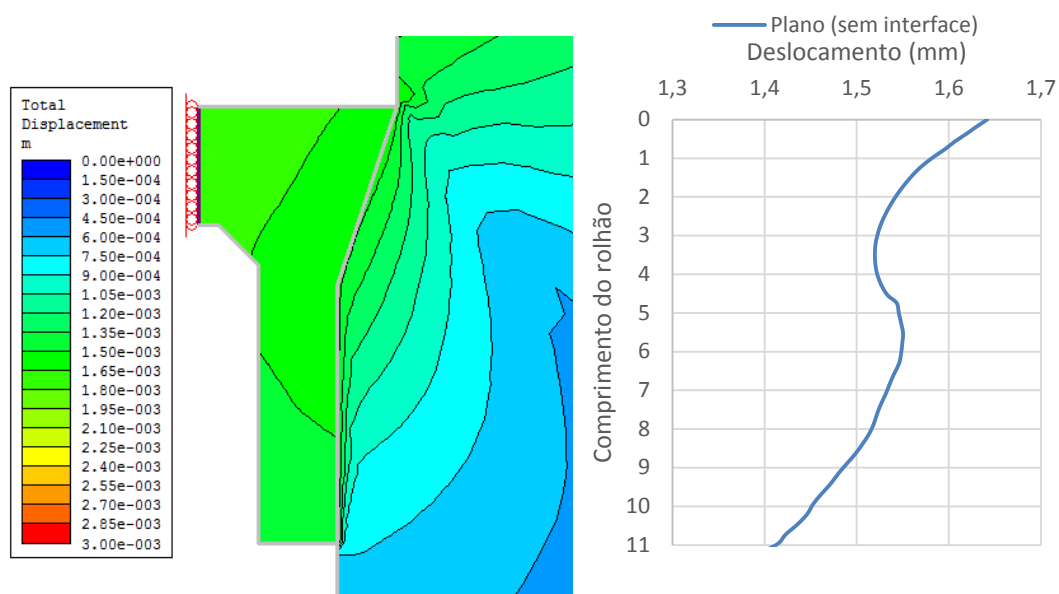


Fig.3.38 Deslocamentos totais para o caso plano sem interface - Cenário 3.

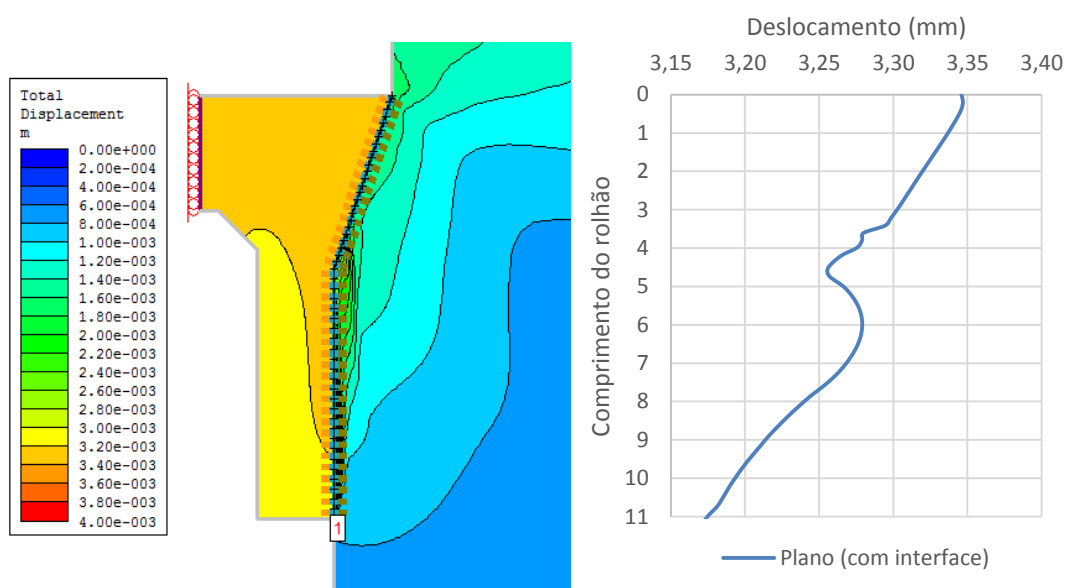


Fig.3.39 Deslocamentos totais para o caso plano com interface - Cenário 3.

Para esta simulação temos desenvolvimentos semelhantes entre os casos planos, no entanto, verifica-se nos três gráficos (Fig.3.37 a Fig.3.39) que existe uma mudança de tendência entre os 4 e os 5m. Esta quebra no desenvolvimento, mais uma vez, coincide com a alteração da geometria do rolhão.

De seguida apresentam-se os valores dos deslocamentos máximos e mínimos:

Quadro 3.5 Deslocamentos máximos e mínimos - Cenário 3.

	Deslocamento máximo	Deslocamentos mínimos
Axissimétrico	0.18 mm	0.08 mm
Plano (sem interface)	1.64 mm	1.39 mm
Plano (com interface)	3.35 mm	3.17 mm

Passando à análise dos deslocamentos, podemos concluir, através da razão $\frac{\text{Plano (sem interface)}}{\text{Axissimétrico}}$, que a mesma varia no intervalo numérico 9 a 18.

Mais uma vez, a influência da modelação de uma interface resulta na duplicação do valor dos deslocamentos. Esta conclusão pode ser confirmada se dividirmos os deslocamentos máximos e mínimos da modelação plana com interface pelos da modelação plana sem interface.

Por fim, apresenta-se o gráfico correspondente à interpolação da curva teórica do comportamento de um modelo axissimétrico com interface, por aplicação da expressão 3.2.

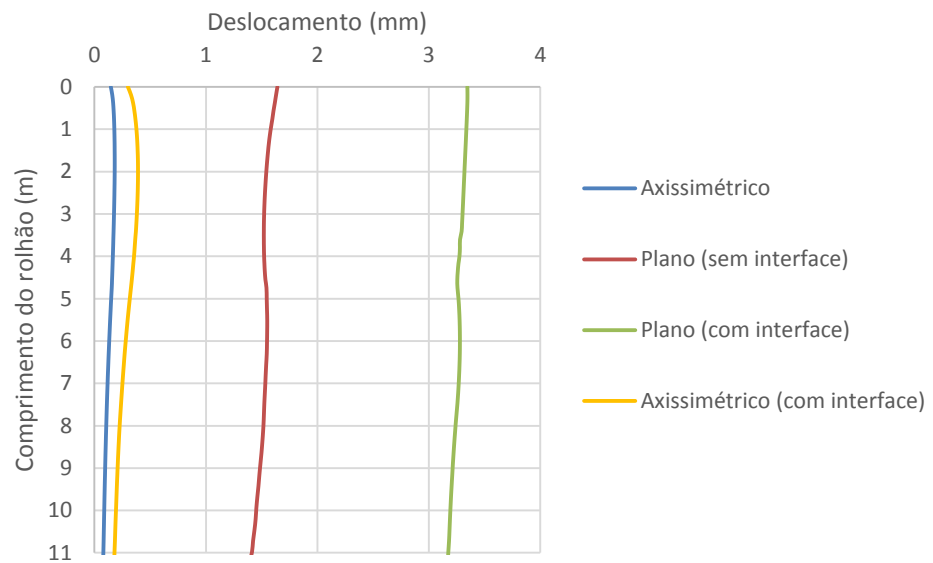


Fig.3.40 Deslocamentos totais - Cenário 3.

3.3.4.4 Cenário 4

O quarto cenário caracteriza-se pelo facto de a sua geometria ser a mais equilibrada de todos os casos. Apresenta-se com uma quebra suave, que mobiliza as componentes normal e tangencial, e finaliza a sua secção num troço linear.

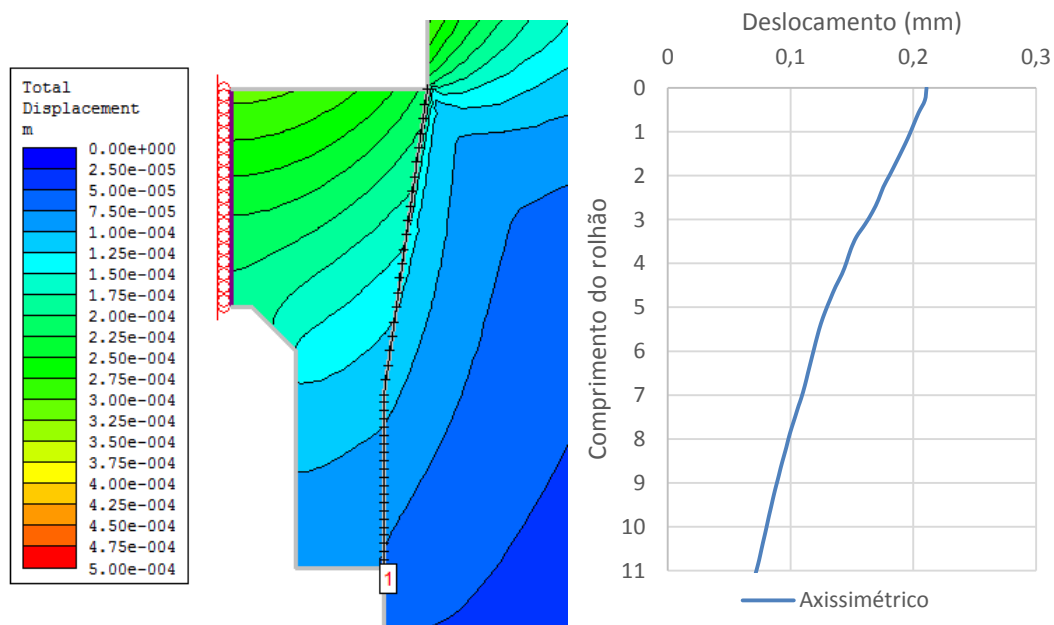


Fig.3.41 Deslocamentos totais para o caso axissimétrico – Cenário 4.

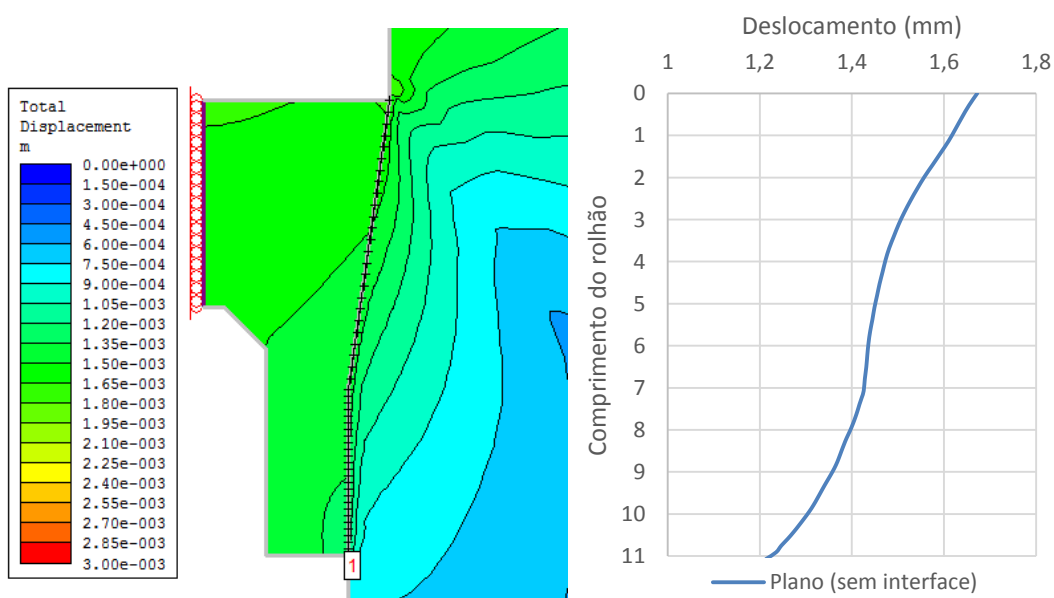


Fig.3.42 Deslocamentos totais para o caso plano sem interface – Cenário 4.

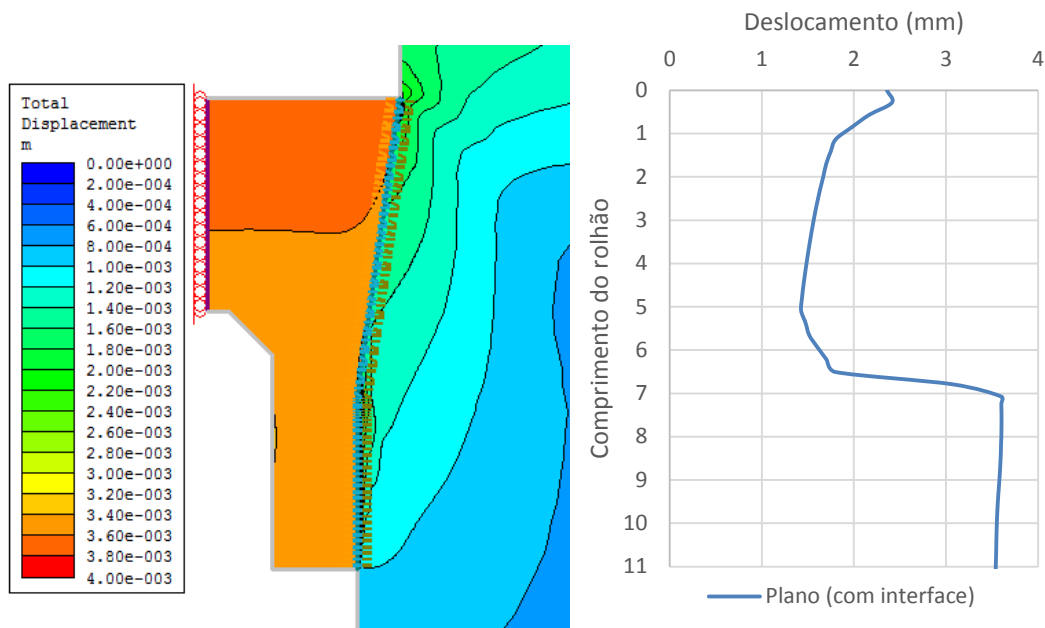


Fig.3.43 Deslocamentos totais para o caso plano com interface – Cenário 4.

Para este Cenário 4, quando analisamos os gráficos dos deslocamentos (Fig.3.41 a Fig.3.43) podemos constatar que as duas primeiras modelações apresentam características semelhantes no seu desenvolvimento. O caso particular reside no gráfico correspondente ao estado plano com interface, que ao contrário do que acontece nos outros cenários, apresenta-se muito irregular. Também é possível constatar que os maiores deslocamentos ocorrem neste mesmo caso.

Quadro 3.6 Deslocamentos máximos e mínimos - Cenário 4.

	Deslocamento máximo	Deslocamentos mínimos
Axissimétrico	0.21 mm	0.07 mm
Plano (sem interface)	1.67 mm	1.21 mm
Plano (com interface)	3.60 mm	1.43 mm

Analisando os deslocamentos podemos concluir, novamente pela razão $\frac{\text{Plano (sem interface)}}{\text{Axissimétrico}}$, que os deslocamentos no plano sem interface são 8 a 17 vezes superiores. Quanto à comparação entre os estados planos, não podemos chegar a uma conclusão tão exata devido à irregularidade da curva do estado plano com interface.

Para finalizar esta primeira análise de resultados está representada, a amarelo, a curva teórica correspondente ao caso axissimétrico com interface (Fig.3.44).

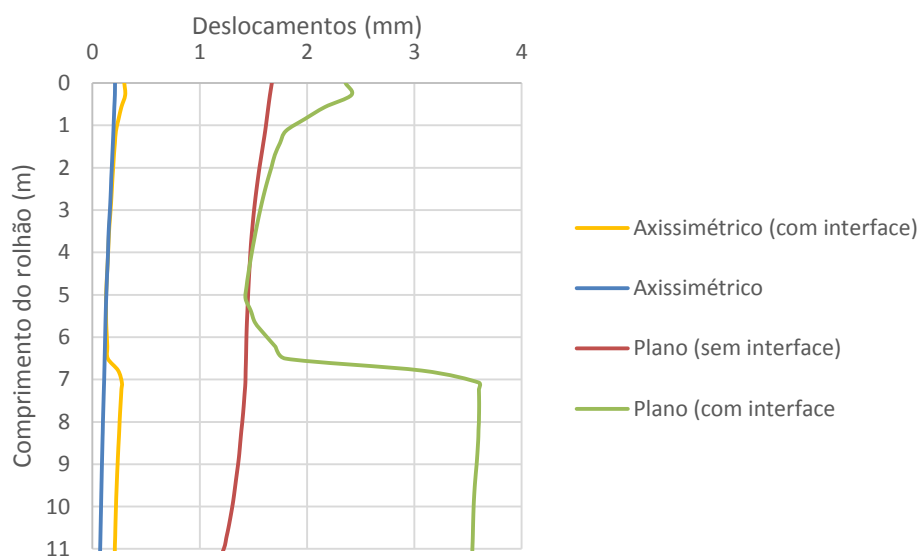


Fig.3.44 Deslocamentos totais - Cenário 4.

3.3.4.5 Conclusões gerais

Após apresentados os resultados e feito um comentário sobre os valores relativos, importa tecer algumas considerações gerais, focando os pontos comuns e os que tornam a geometria e/ou modelo de análise um caso singular.

Podemos concluir que quando se modela o problema de forma axissimétrica os deslocamentos observados rondam a décima de milímetro. Já para as modelações em estado plano apresentam valores na ordem dos milímetros, sendo que o caso extremo encontra-se na modelação com interface onde chegamos a registar deslocamentos de 9mm (Cenário 2).

Quadro 3.7 Quadro resumo dos deslocamentos máximos.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Axissimétrico	0.12 mm	0.13 mm	0.18 mm	0.21 mm
Plano (sem interface)	2.15 mm	1.85 mm	1.64 mm	1.67 mm
Plano (com interface)	4.06 mm	9.15 mm	3.35 mm	3.60 mm

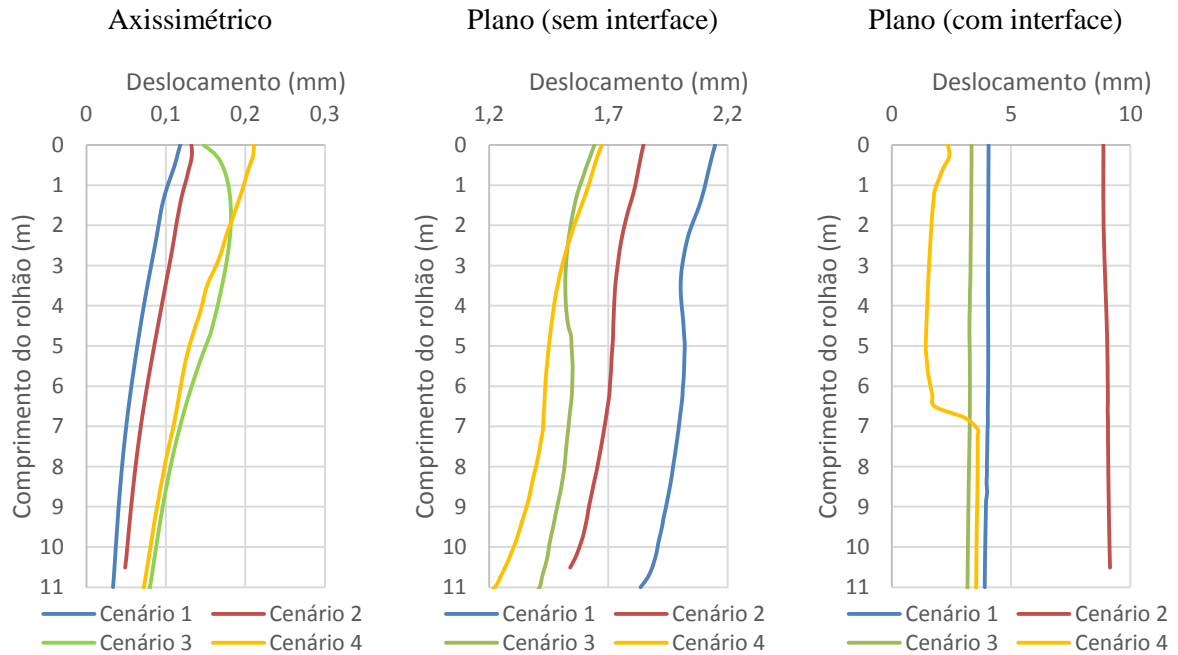


Fig.3.45 Resumo de todos os deslocamentos nos vários tipos de modelação.

A Fig.3.45 permite-nos tecer algumas considerações dentro do mesmo tipo de análise:

- ✓ A simulação axissimétrica desenvolve-se de forma linear, no sentido do maior deslocamento para o menor, exceto no Cenário 3;
- ✓ Quanto ao estado plano sem interface, o desenvolvimento da curva apresenta uma forma semelhante a um “S”. Com o intuito de averiguar se esta quebra era devida à geometria do rolhão ou à função que o mesmo deverá desempenhar, modelaram-se dois rolhões totalmente preenchidos com betão. As geometrias escolhidas são semelhantes as dos Cenários 1 e 3.

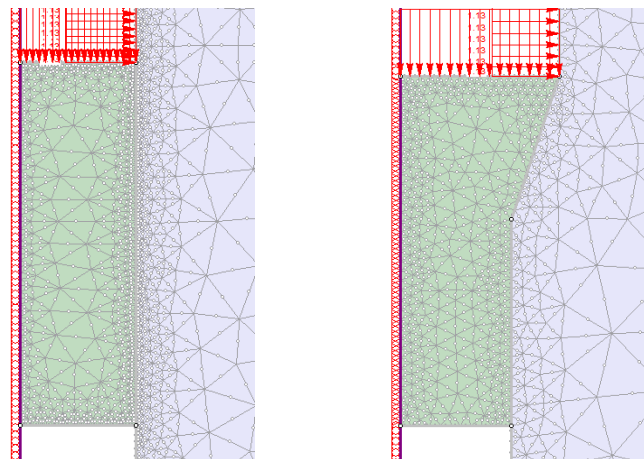


Fig.3.46 Rolhões totalmente preenchidos (C1 (esquerda) e C3 (direita)).

Após determinados os deslocamentos (Fig.3.47) verificou-se que os mesmos apresentavam um desenvolvimento linear, o que nos permite concluir que a mudança de tendência está relacionada com a mudança da geometria interna do rolhão.

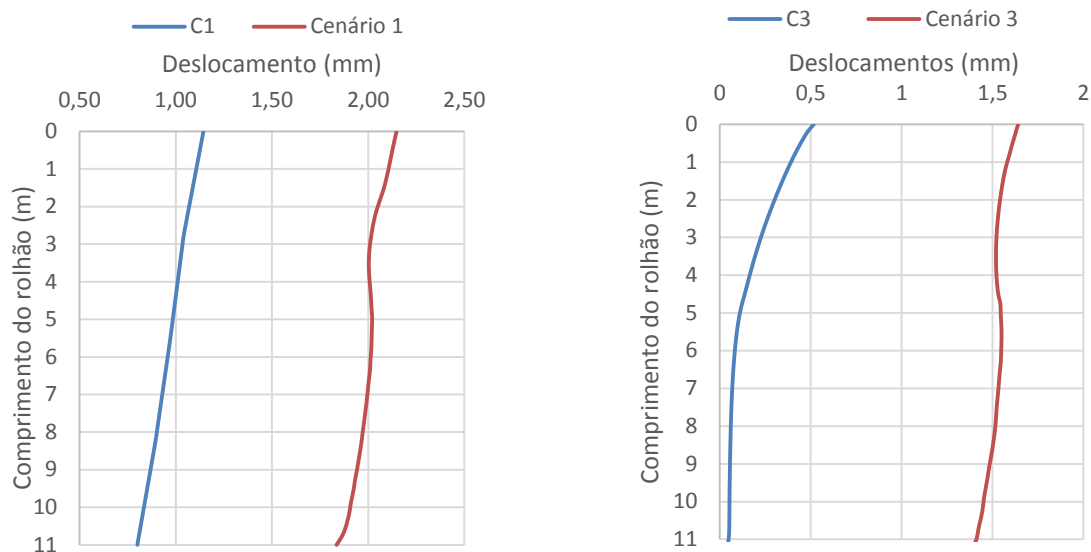


Fig.3.47 Gráfico relativo à comparação dos deslocamentos.

- ✓ Por fim, no estado plano com interface temos que os Cenários 1 e 3 apresentam desenvolvimentos semelhantes. Já o 2, como já foi referido anteriormente, difere dos restantes uma vez que ao longo do comprimento do rolhão o deslocamento aumenta em vez de reduzir como nos restantes casos. O Cenário 4 fica marcado pela sua irregularidade.

Tecidas as considerações, temos que esta primeira análise permitiu ganhar alguma sensibilidade quanto aos deslocamentos espectáveis para este tipo de estruturas consoante a sua geometria.

Apesar de expectável, também nos permitiu confirmar que a modelação axissimétrica é a que melhor representa a tridimensionalidade do problema e a que apresenta melhores resultados.

4

VENDA NOVA III

4.1. ENQUADRAMENTO

O segundo caso de estudo está ligado ao reforço de potência de Venda Nova III. Este empreendimento insere-se no aproveitamento de Venda Nova/ Vila Nova, que se localiza no concelho de Montalegre, mais propriamente no troço final do rio Rabagão.

Começando por abordar o empreendimento em geral, temos que a construção do Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova/Vila Nova iniciou-se em 1945 e tinha como objetivos garantir, à data, o abastecimento público de eletricidade [18].

O escalão do aproveitamento é constituído por uma barragem do tipo arco gravidade espessa de betão, com 97m de altura criando uma albufeira capaz de armazenar 95 milhões de m³ de água. Já o circuito hidráulico, que alimenta a central de Vila Nova, é constituído por um túnel, chaminé de equilíbrio e conduta forçada, com 3.9km de extensão total, até à central onde se localizam os grupos geradores que turbinam os caudais derivados a partir de Venda Nova bem como os provenientes de Paradela.

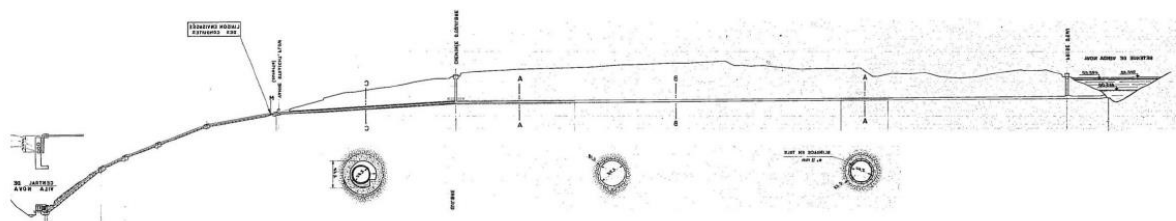


Fig.4.1 Escalão de Venda Nova / Vila Nova - Perfil longitudinal [18].

Dentro do circuito hidráulico podemos distinguir 4 zonas:

- ✓ A primeira é constituída por um túnel aberto em rocha e revestido a betão, com um diâmetro inferior a 3.35m e uma extensão de 1953m;

- ✓ A segunda compreende uma zona em túnel com revestimento blindado a chapa de aço com 2.60m de diâmetros interior e um comprimento de 520m;
- ✓ Já a terceira caracteriza-se por ser um troço de 565m de extensão em que se instalou uma conduta de aço, com 2.40m de diâmetro, numa galeria revestida de betão, com 3.5m de diâmetro;
- ✓ Por último, na quarta zona, tem-se uma conduta a céu aberto com uma extensão de 881m e um diâmetro que varia entre os 2 e os 2.35m, em traineis com inclinações variáveis, atingindo um máximo de 80%.

É de realçar que na transição da zona da conduta implantada em galeria para a zona a céu aberto está instalada uma válvula com o diâmetro de 2.4m.

Passando à chaminé de equilíbrio, esta encontra-se inserida na zona blindada da galeria em carga, é do tipo poço, com câmara superior de expansão e inferior de alimentação, e possui 80m de altura.

Já a central, está inserida a céu aberto na margem esquerda do rio Cávado. Encontra-se equipada com três grupos Pelton de eixo horizontal, com uma potência de 30MW cada, sendo o caudal nominal de 30m³/s. A subestação e os transformadores monofásicos de 3x10MVA encontram-se localizados nas traseiras da central e no topo da cobertura.

Este aproveitamento beneficia de uma queda bruta máxima de 431.8m e mínima de 354.8m, levando a uma produtividade média de 389×10^6 kWh. A entrada em funcionamento ocorreu em 1951 e, atualmente, ainda se mantém em serviço.

Com o passar dos tempos, os perfis de consumo de eletricidade foram-se alterando e exigindo transformações significativas no regime de funcionamento das centrais hidroelétricas. Estas deixaram de funcionar num regime diário, quase contínuo, para passarem a operar apenas nas horas de maior consumo. Neste contexto, os aproveitamentos com baixas potências e albufeiras de menor capacidade de armazenamento deixaram de ter um papel principal na satisfação das necessidades energéticas. O que foi uma das razões que levaram ao reforço de potência do aproveitamento original com novos grupos, mais potentes e eficientes, com capacidade para armazenar energia. Assim surgiu o primeiro reforço de potência.

4.1.1. PRIMEIRO REFORÇO DE POTÊNCIA – VENDA NOVA II/FRADES

O escalão de Venda Nova II, atualmente designada por Central de Frades, entrou em serviço em 2005. É constituído por um novo circuito hidráulico e uma central, totalmente subterrâneos, inseridos na encosta da margem esquerda do rio Rabagão e fisicamente independente do aproveitamento de Venda Nova/Vila Nova. Este escalão tira partido das duas albufeiras existentes, Venda Nova a montante e Salamonde a jusante, e da elevada queda de 420m conseguida num troço do rio de aproximadamente 4km.

A central de Frades consiste numa caverna subterrânea a cerca de 350m de profundidade, apresentando cerca de 60m de comprimento, e num circuito hidráulico extenso (2.8km a montante da central (túnel em carga) e 1.4km a jusante (túnel de restituição)), que totaliza 4.2km. Na central estão instalados dois grupos geradores reversíveis, de eixo vertical e com turbinas tipo Francis. Ambos os

túneis apresentam uma secção de escavação não revestida do tipo circular, com 6.30m de diâmetro e soleira plana.

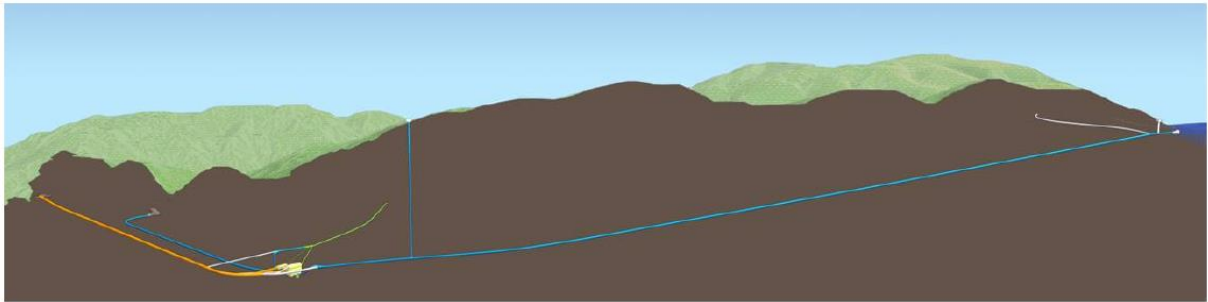


Fig.4.2 Venda Nova II - Perfil longitudinal [18].

Quanto à tomada de água, a que funciona em turbinamento, fica situada na margem esquerda da albufeira de Venda Nova a cerca de 400m do encontro esquerdo da barragem. Já a de bombagem, localiza-se na margem esquerda do rio Rabagão, aproximadamente a 150m de montante da confluência deste rio com o Cávado.

Focando agora o circuito hidráulico, este dispõe de duas chaminés de equilíbrio. A chaminé de equilíbrio superior é constituída essencialmente pelo poço de ligação ao túnel em carga (com 320m de altura e 4.5m de diâmetro), pela chaminé de equilíbrio propriamente dita, formada por um poço revestido em betão armado (com 100m de altura e 5m de diâmetro) e pela câmara de expansão à superfície. Por sua vez, a chaminé de equilíbrio inferior dispõe de duas câmaras, uma de alimentação e outra de expansão, unidas por um poço circular com 58m de altura e 5m de diâmetro.

Por fim, a central é equipada com dois grupos geradores reversíveis, de eixo vertical, com turbinas tipo Francis, com uma potência de 97.4 MW / 106.4 MVA cada, correspondendo a um caudal turbinado de $25\text{m}^3/\text{s}$ e um caudal de $20\text{m}^3/\text{s}$ em modo bomba.

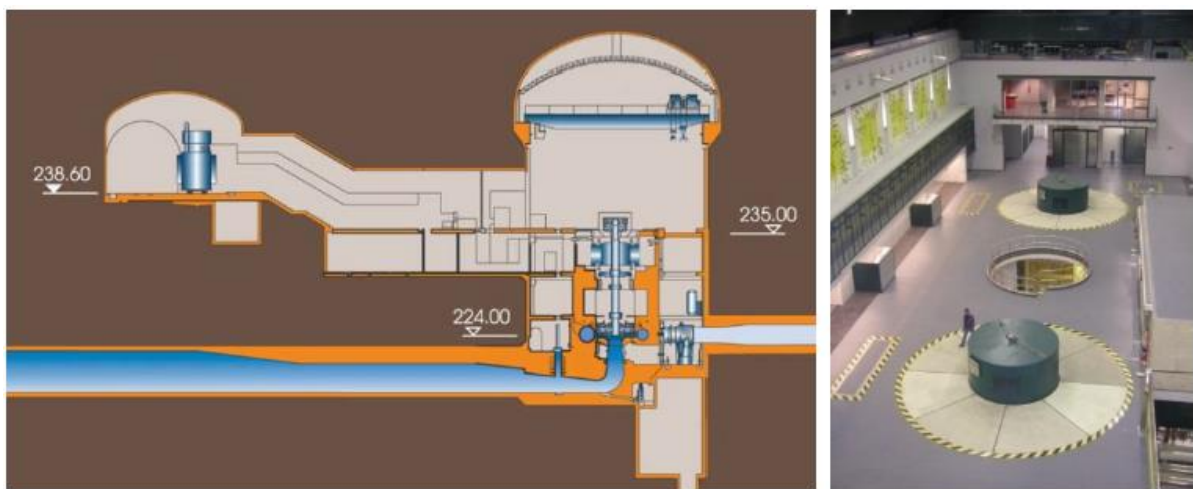


Fig.4.3 Caverna da central de Frades [18].

4.1.2. SEGUNDO REFORÇO DE POTÊNCIA – VENDA NOVA III

O desenvolvimento do projeto do segundo reforço de potência resulta de alguns fatores que voltaram a colocar a hidroeletricidade na linha da frente do sistema elétrico português, com particular destaque para os aproveitamentos equipados com bombagem. Dos fatores que potenciaram este reforço destacam-se [18]:

- ✓ O enorme crescimento da produção de eletricidade por fontes renováveis e intermitentes, designadamente a energia eólica, e a consequente necessidade de capacidade de armazenamento;
- ✓ A fixação dos objetivos nacionais para aumentar a produção de energia com base em fontes renováveis, com vista a reduzir as emissões de gases de efeito de estufa;
- ✓ A necessidade da redução da dependência energética do país em relação aos combustíveis fósseis.

Quanto ao projeto em si, Venda Nova III é similar a Venda Nova II, apesar da potência instalada ser bastante superior. No entanto, no que diz respeito ao traçado do circuito hidráulico e ao posicionamento da central, uma vez tomada a decisão de implementar o novo circuito na mesma margem que Venda Nova II fez com que este se constituísse como um elemento condicionante do novo traçado.

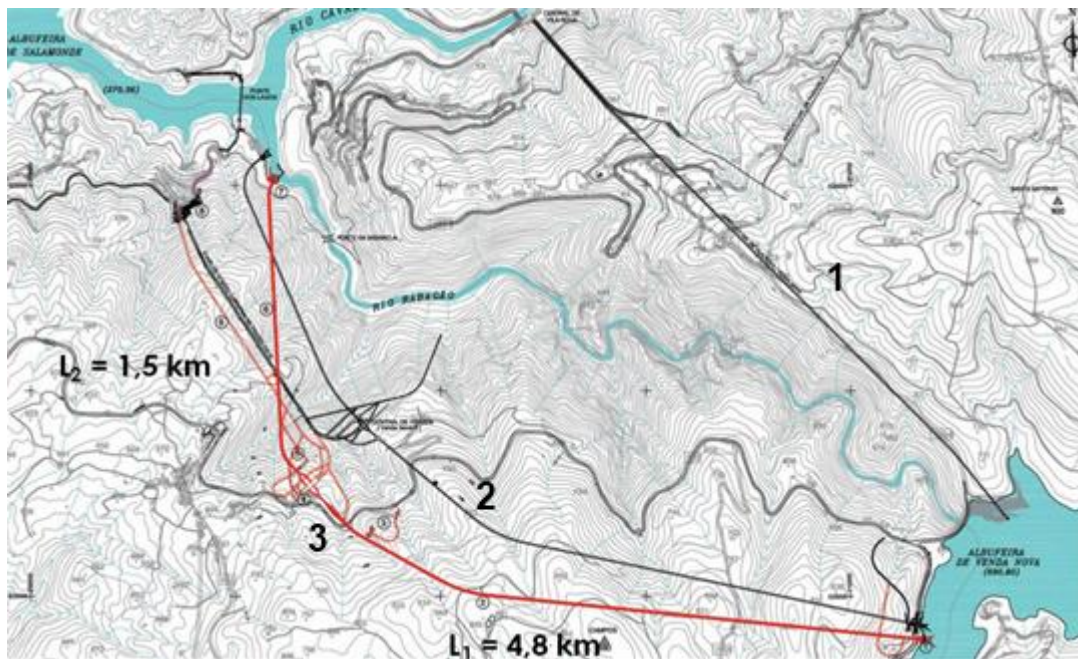


Fig.4.4 Aproveitamento Venda Nova/Vila Nova (1- Venda Nova /Vila Nova; 2- Venda Nova II; 3- Venda Nova III) [18].

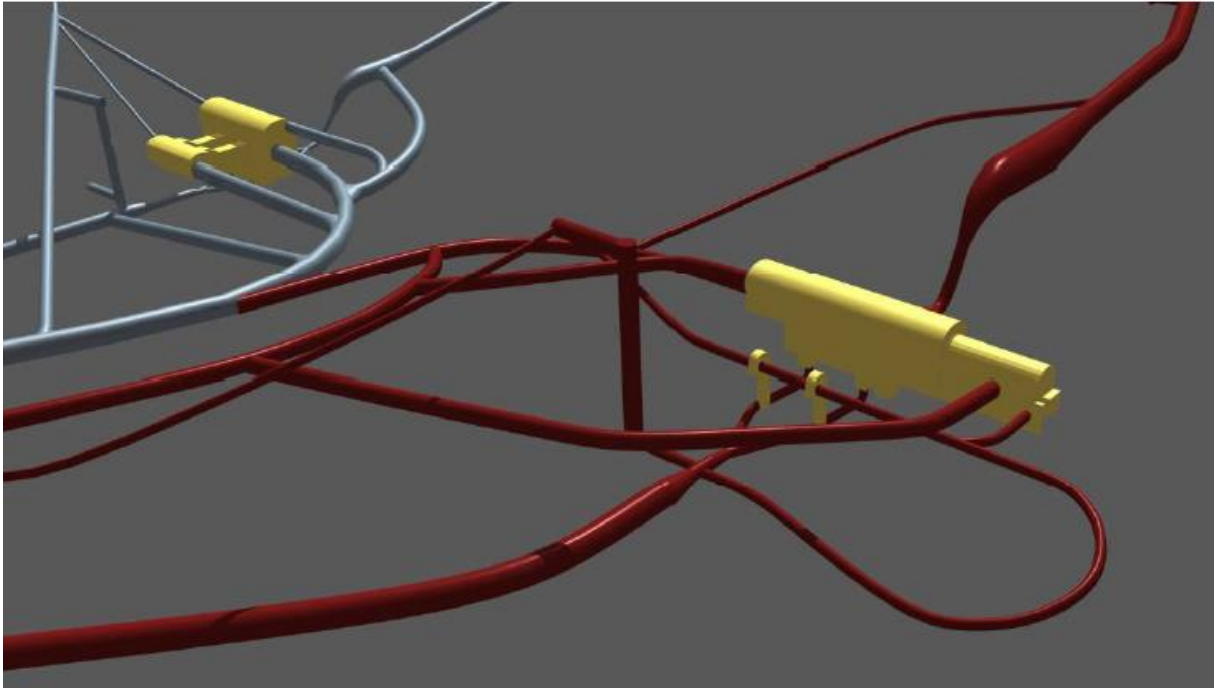


Fig.4.5 Representação esquemática do complexo da Central. (azul - Venda Nova II; vermelho - Venda Nova III) [18].

As condicionantes indicadas permitiram fixar a posição das quatro localizações determinantes, para a definição do traçado: a tomada de água, a chaminé de equilíbrio superior, a central e a restituição. Assim como, fixar os traçados dos tuneis em carga e de restituição.

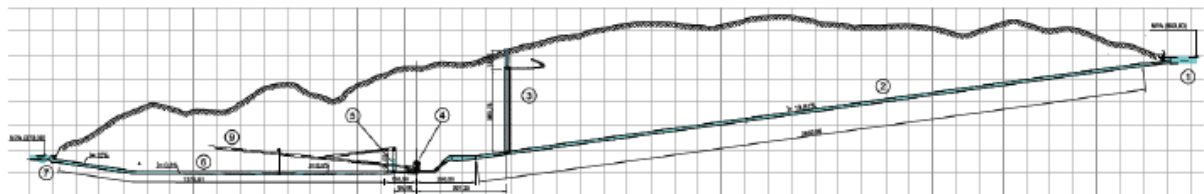


Fig.4.6 Perfil longitudinal de Venda Nova III (1-Tomada de água; 2-Túnel em carga; 3-Chaminé de equilíbrio superior; 4-Central; 5-Chaminé de equilíbrio inferior; 6-Túnel de restituição; 7-Restituição) [18].

Destacando o circuito hidráulico (Fig.4.6), temos que este é composto pelos seguintes elementos principais [19]:

✓ Tomada de água (Fig.4.7)

A tomada de água é constituída por um bocal de secção retangular, dotado de uma grade fixa, e por uma torre destinada ao abrigo e manobra das comportas que são acessíveis a partir de um viaduto;

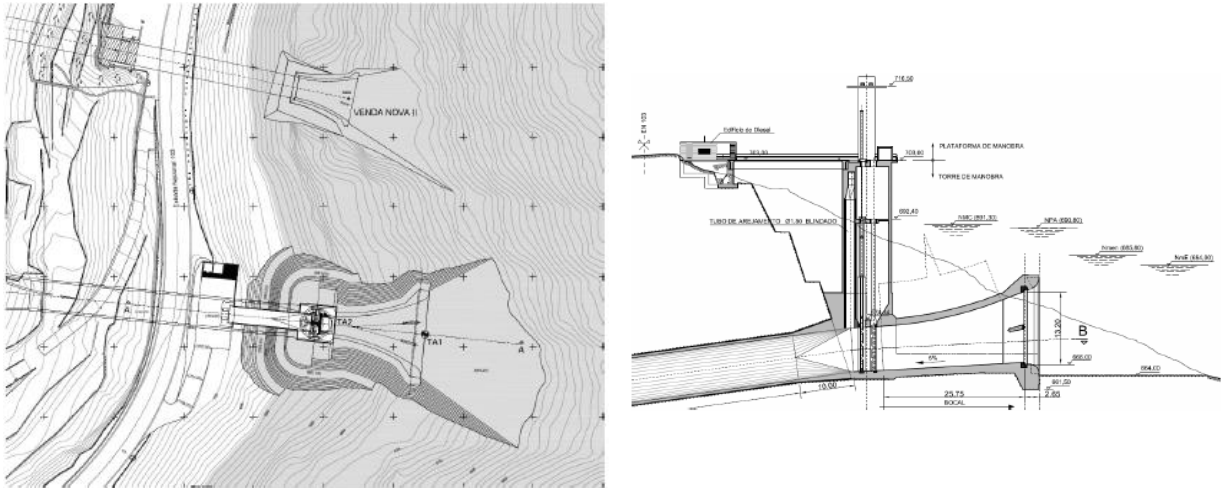


Fig.4.7 Tomada de água – Planta e Corte vertical (respetivamente) [18].

✓ Túnel em carga

Este túnel tem 2840m de comprimento e apresenta uma inclinação de 13.8%. A sua secção transversal é do tipo circular modificada com um diâmetro de 12m. Apresenta uma secção não revestida, que se desenvolve entre a tomada de água e a central. O seu troço final, adjacente à central é blindado.

✓ Chaminé de equilíbrio superior (Fig.4.8)

Está localizada a 390m a montante da central, é formada por um poço superior revestido em betão armado com 78m de altura e 13m de diâmetro, uma câmara de expansão à superfície, uma câmara de alimentação intermédia e dois poços com 360m de altura e 5.4m de diâmetro, que ligam o túnel em carga à câmara de alimentação.

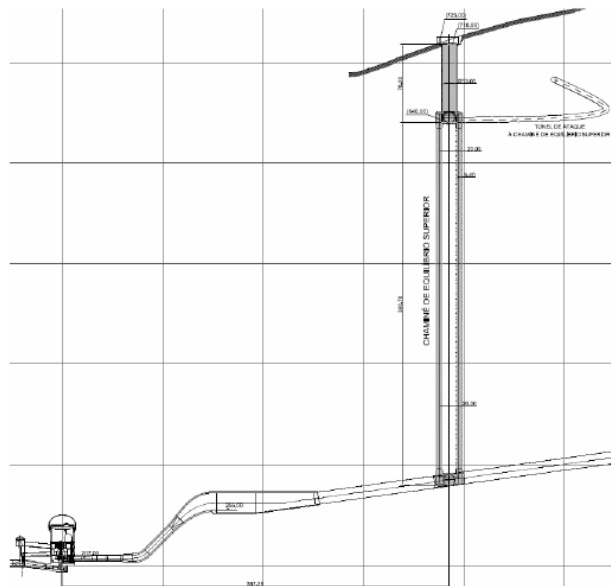


Fig.4.8 Chaminé de equilíbrio superior - Perfil longitudinal [18].

✓ Túnel de restituição (Fig.4.9)

Praticamente horizontal, com 1380m de comprimento e com a mesma secção transversal do túnel em carga, que se desenvolve entre a central e a restituição

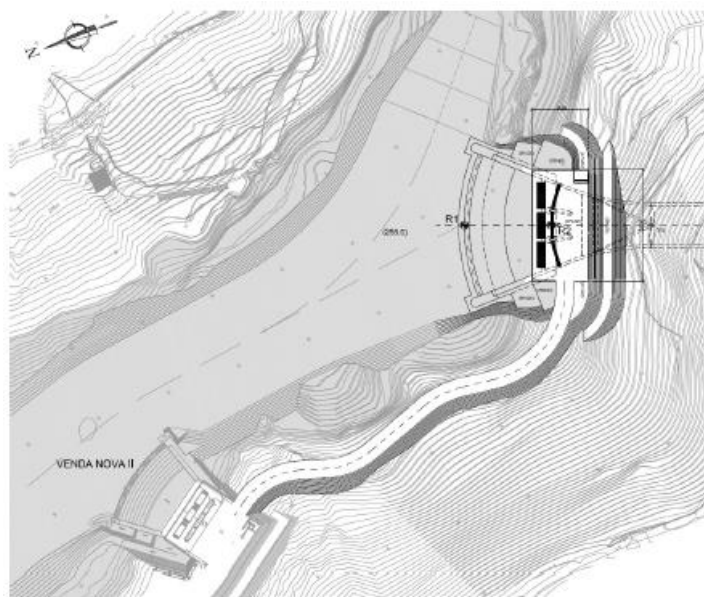


Fig.4.9 Restituição - Planta geral [18].

✓ Restituição (Fig.4.10)

A restituição encontra-se na albufeira de Salamonde e funciona como tomada de água quando nos encontramos a bombear a água. É constituída por um bocal com ranhuras destinadas á colocação alternativa de grades amovíveis e das comportas ensecadeiras;

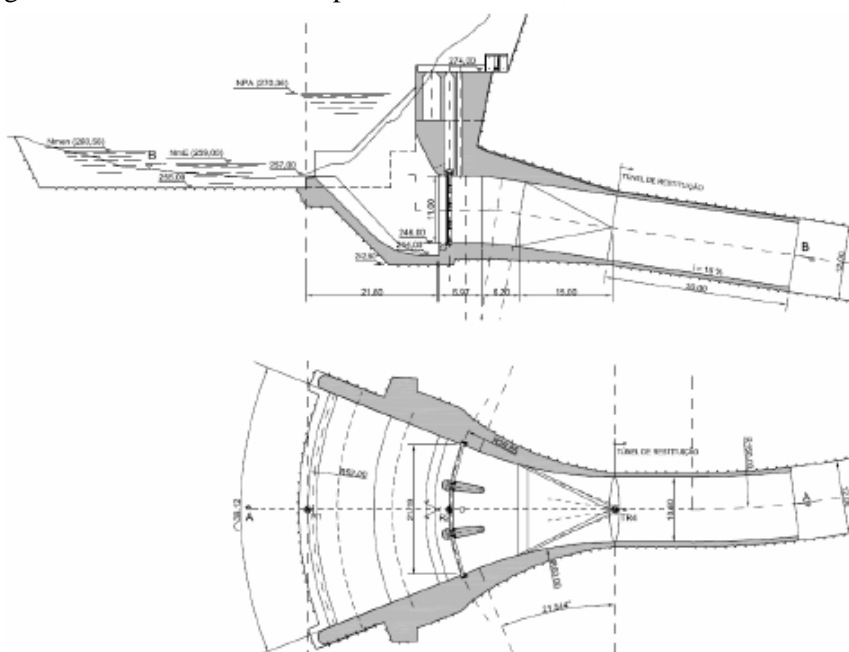


Fig.4.10 Restituição - Planta e perfil longitudinal [18].

✓ Chaminé de equilíbrio inferior (Fig.4.11): localizada a 95m a jusante da central, formada por um poço revestido em betão armado com 95m de altura e 13m de diâmetro e por uma câmara de expansão na parte superior do poço.

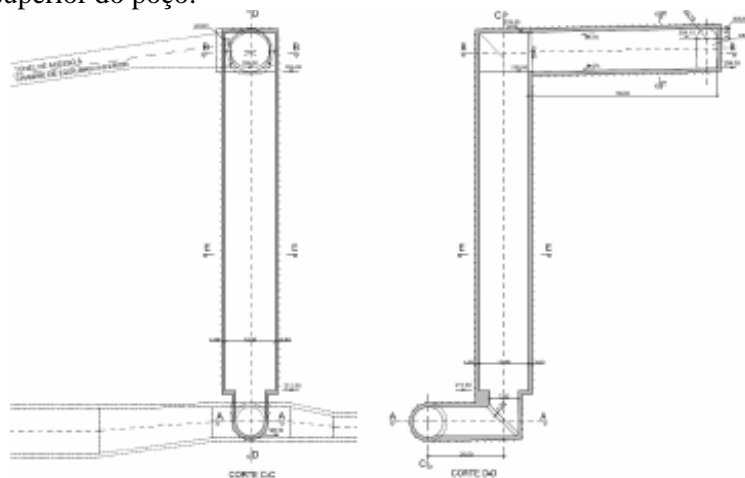


Fig.4.11 Chaminé de equilíbrio inferior – Cortes [18].

Por último, e não menos importante, temos a Central (Fig.4.12). Esta nova central consiste numa caverna com cerca de 150m de comprimento, localizada numa posição intermédia do circuito hidráulico, sendo composta por duas câmaras principais: a câmara dos grupos e a câmara dos transformadores (Fig.4.13 e Fig.4.14). O piso principal encontra-se à cota (223.75), a cerca de 400m de profundidade.

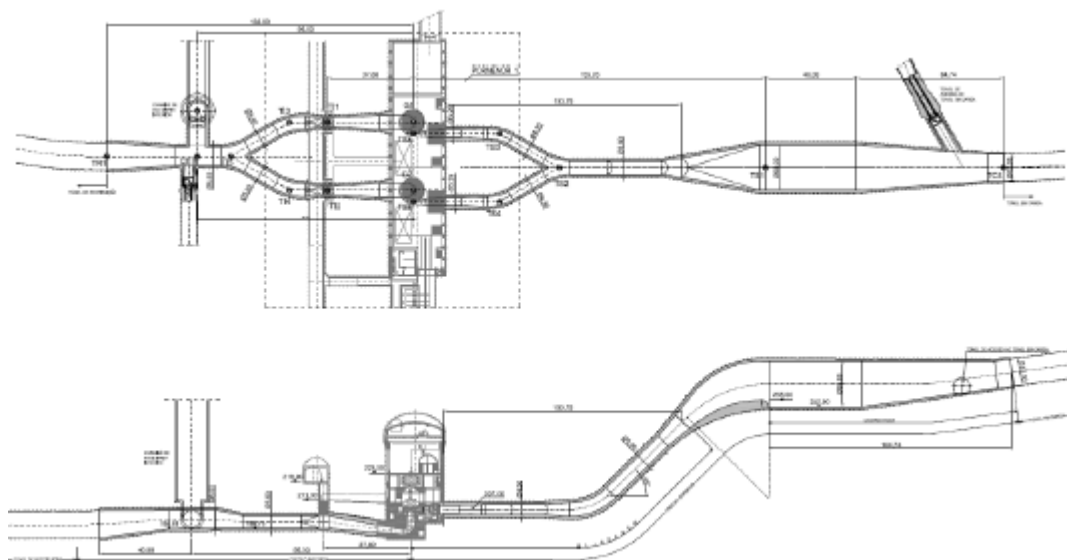


Fig.4.12 Circuito hidráulico na zona da central - Planta e perfil longitudinal [18].

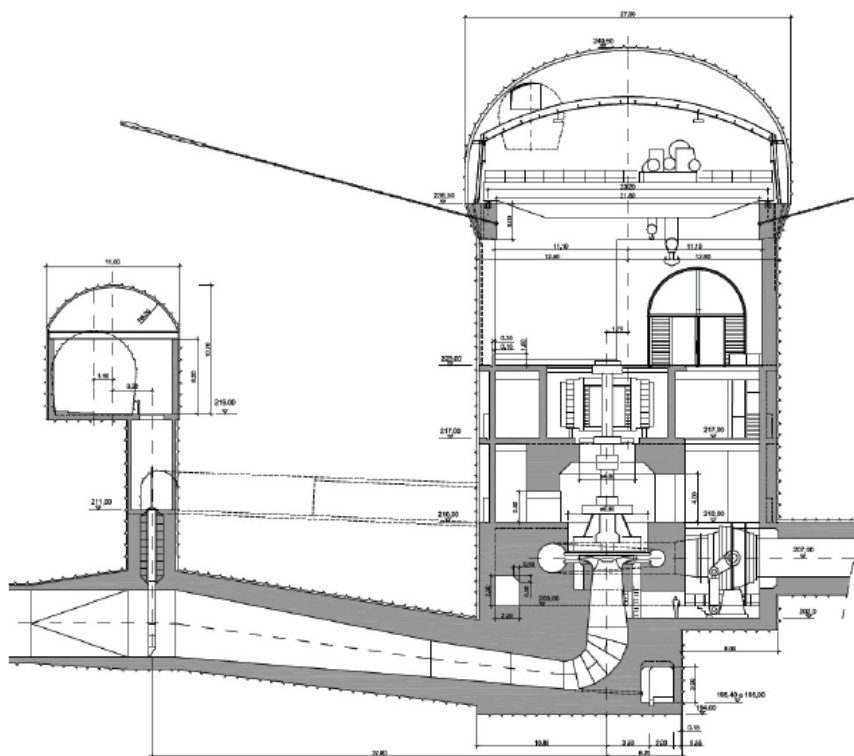


Fig.4.13 Central - Corte transversal pelo eixo de um grupo [18].

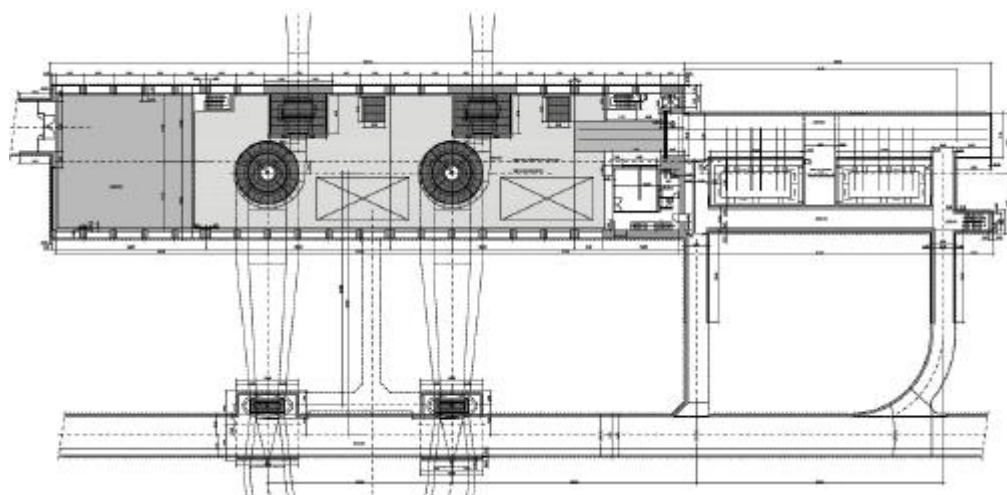


Fig.4.14 Central: câmaras dos grupos, dos transformadores e das comportas [18].

A câmara dos grupos apresenta, em plantas, as dimensões úteis de 22m x 101.5m e uma altura máxima de 55m. Os principais equipamentos, tais como, os grupos reversíveis de velocidade variável, o comando e controlo e as válvulas esféricas, serão alojados nesta câmara [19].

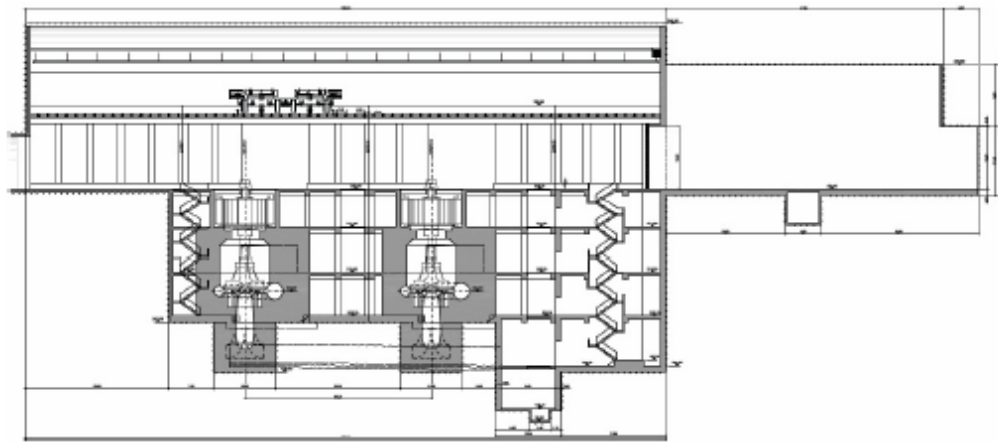


Fig.4.15 Central: corte longitudinal [18].

Já a câmara dos transformadores, onde serão instalados os transformadores principais de 2x465 MVA e os equipamentos elétricos associados, possui uma largura de 19.6m e um comprimento total de 50m. As comportas de proteção dos grupos encontram-se instaladas numa câmara, a jusante da central, com 11m de largura, 43m de comprimento e 10.4m de altura. Esta câmara está localizada num túnel que se desenvolve paralelamente á câmara dos grupos.

Quanto aos grupos reversíveis que serão instalados, temos que a nova central irá ser apetrechada com grupos equipados com uma máquina assíncrona de velocidade variável, duplamente alimentada. Ambas as máquinas assíncronas possuem uma potência nominal de 420MVA, tensão nominal de 21kV e uma velocidade síncrona de 375rpm [19].

4.2. MODELAÇÃO

Tal como já foi mencionado no caso de estudo anterior, o processo de modelação de uma estrutura requer a introdução de parâmetros no *software*. Assim, pretende-se fazer uma descrição de todos os parâmetros adotados para esta análise. No entanto, estes parâmetros são gerais, caso haja alteração dos mesmos, será efetuada uma chamada de atenção. O programa utilizado será o Phase².

4.2.1. LOCALIZAÇÃO DO ROLHÃO E CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO

Antes de pensar na geometria do rolhão temos de localizar a zona onde o mesmo poderá ser inserido. Deste modo, procedendo à análise da Planta Geológico-Geotécnica seleccionou-se a respetiva zona.



Fig.4.16 Zona onde será inserido o rolhão [20].

Visto ser necessário efetuar limpezas periódicas do desarenador, determinou-se que o rolhão deverá ficar junto do mesmo para facilitar a execução dos trabalhos.

Após a seleção da região é necessário proceder a uma análise dos dados existentes. Como é possível ver na Fig.4.17, a região seleccionada abrange 3 zonas que se distinguem em função do tipo de suporte utilizado na escavação do túnel. A cada zona está associada uma cor, sendo que a azul irá corresponder a um tipo de suporte utilizado num maciço com boas características, o verde a características intermédias e, por fim, o amarelo ao maciço com piores características.

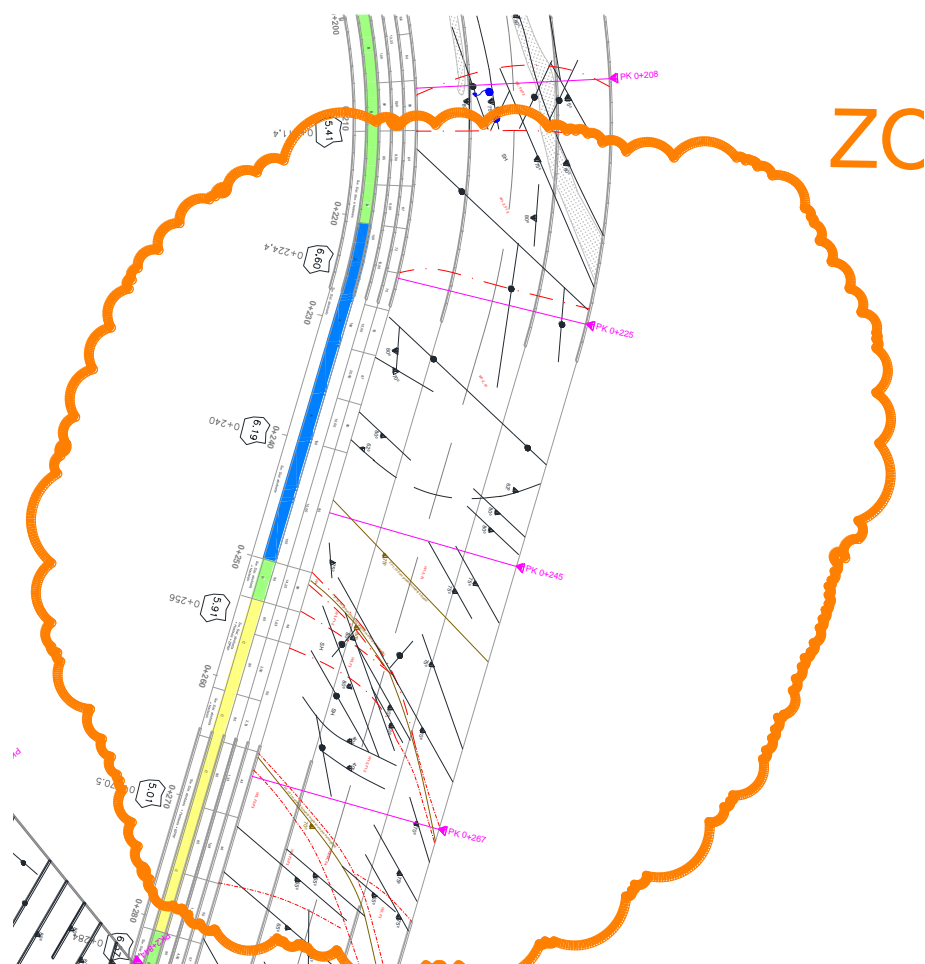


Fig.4.17 Pormenor da zona do rolhão [20].

A partir da planta foram retirados os valores do RMR e do Índice Q. Utilizando a média dos valores da classificação RMR, em conjunto com a equação 2.6 (Cap.2 – 2.3.1), foi possível determinar o módulo de deformabilidade médio (E_m) de cada zona (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 Valores médios do Módulo de Deformabilidade e do índice RMR.

	RMR (médio)	E_m (GPa)
Maciço 1 (azul)	70	45 GPa
Maciço 2 (verde)	57	15 GPa
Maciço 3 (amarelo)	47	8.9 GPa

Após a determinação do E_m e considerando o maciço como um material que obedece ao critério de cedência de Mohr-Coulomb, introduziram-se os valores do Quadro 4.1 no *software* RocLab. A utilização deste *software* permitiu-nos estimar os parâmetros que caracterizam o maciço rochoso. De seguida apresentam-se os parâmetros obtidos e que serão utilizados na modelação.

Quadro 4.2 Características do maciço.

Maciço 1 (azul)	E (GPa)	20 GPa
	c / c[residual] (MPa)	2.6 MPa / 2 MPa
	ϕ / ϕ (residual) (°)	50° / 40°
	σ_t (MPa)	0.200 MPa
Maciço 2 (verde)	E (GPa)	3 GPa
	c / c[residual] (MPa)	1.7 MPa / 1.3 MPa
	ϕ / ϕ (residual) (°)	45° / 36°
	σ_t (MPa)	0.065 MPa
Maciço 3 (amarelo)	E (GPa)	1 GPa
	c / c[residual] (MPa)	1.4 MPa / 1.1 MPa
	ϕ / ϕ (residual) (°)	44° / 35°
	σ_t (MPa)	0.020 MPa

É de salientar que, os parâmetros de coesão e ângulo de atrito presentes no Quadro 4.2, são iguais aos obtidos pelo *software* afetados de um fator de segurança. Neste caso, o fator de segurança tomou o valor de 1.2.

$$c = \frac{c \text{ (RocLab)}}{1.2} \quad (4.1)$$

$$\tan \phi = \frac{\tan \phi \text{ (RocLab)}}{1.2} \quad (4.2)$$

Em anexo encontra-se um exemplo da obtenção dos parâmetros referidos no Quadro 4.2 (A 2.1), assim como, um exemplo dos elementos recolhidos em campo, que nos permitem a obtenção das classificações geológico-geotécnicas (A 2.2 a A 2.4).

4.2.2. GEOMETRIA DO ROLHÃO

Este rolhão estará inserido num túnel em carga com 8.2m de diâmetro e na sua constituição terá uma parte em betão (cinza), uma blindagem (vermelho) e um revestimento da zona em carga (azul escuro).

Deste modo, à esquerda (Fig.4.18) temos um esquema do rolhão que pretendemos definir e à direita a geometria adotada na modelação (Fig.4.19).

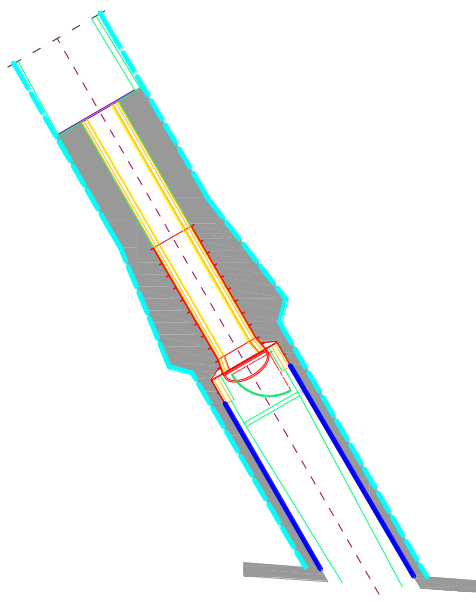


Fig.4.18 Rolhão a definir [21].

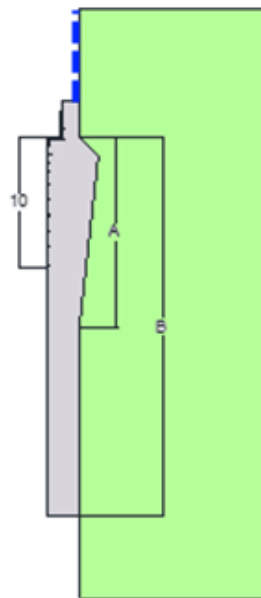


Fig.4.19 Geometria do rolhão

A blindagem será colocada na parte interior do rolhão e terá um comprimento máximo de 10m (assinalado na Fig.4.19). Quanto aos outros parâmetros indicados, A terá um comprimento de 15m, enquanto B, poderá variar desde os 15 até aos 30m, consoante o tipo de análise que estivermos a realizar.

A linha representada a tracejado azul (Fig.4.19), identifica a zona de montante que está em carga e onde há um revestimento em betão. Este revestimento será modelado no Phase² como sendo um *liner* com 1.4m de espessura e com as características do betão que serão expressas de seguida.

4.2.3. CARACTERÍSTICAS DO BETÃO E DA BLINDAGEM

O betão será modelado como tendo um comportamento elástico, apresentando um módulo de elasticidade (E) igual a 30GPa e um coeficiente de Poisson (ν) de 0.25.

Já a blindagem (Fig.4.20) será em aço, para o qual foi considerado em módulo de elasticidade de 200GPa e 0.30 de coeficiente de Poisson. A colocação da blindagem no rolhão prende-se com a necessidade de o dotar de uma porta estanque que permita o acesso ao desarenador, para efetuar limpezas periódicas no mesmo.

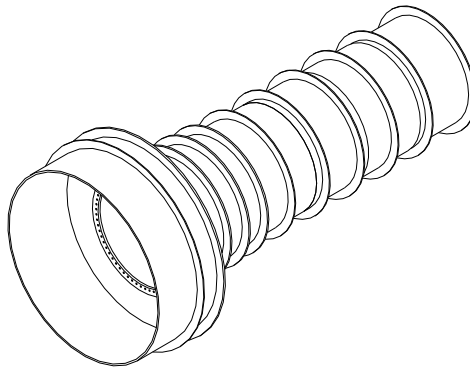


Fig.4.20 Blindagem [22].

4.2.4. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS E CONDIÇÕES FRONTEIRA.

Quanto à malha de elementos finitos gerou-se uma malha com elementos triangulares de 6 nós. Já para as condições fronteira, adotaram-se apoios duplos na fronteira de cima, de baixo e da direita, enquanto na da esquerda se optou pela colocação de apoios de roletes. Os roletes permitem movimentos verticais, enquanto que os apoios duplos impedem os movimentos nas duas direções (x e y).



Fig.4.21 Malha de elementos finitos e condições fronteira.

4.2.5. ESTADO DE TENSÃO INICIAL E CARGA APLICADA NO ROLHÃO.

Para o maciço foi considerado um estado de tensão inicial isotrópico de valor igual ao peso da própria rocha acima da galeria. Considerando que o peso volúmico do maciço é de 25KN/m^3 e que o túnel se encontra a 350m de profundidade, a tensão inicial será de 8.75MPa , igual em todas as direções.

Quanto às cargas aplicadas, na face exterior de montante do rolhão, teremos duas. Uma delas é uma carga uniforme, que corresponde à pressão da água instalada. Para se calcular esta pressão é necessário proceder à diferença de cotas entre a base do rolhão e a cota máxima que a água pode atingir na chaminé de equilíbrio. Esta carga será aplicada não só no rolhão, como também nas paredes do túnel em carga. O seu valor será de:

$$469 \times 9.8 \cong 4.6 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

A segunda carga aplicada no rolhão é linear e representa a resultante da pressão que a água exerce na porta da blindagem. Essa carga é calculada através da seguinte expressão:

$$\frac{\pi D^2}{4} \times 4.6 \div \pi D = 3.45 \text{ MN/m}, \text{ sendo } D \text{ o diâmetro da porta} = 3\text{m} \quad (4.4)$$

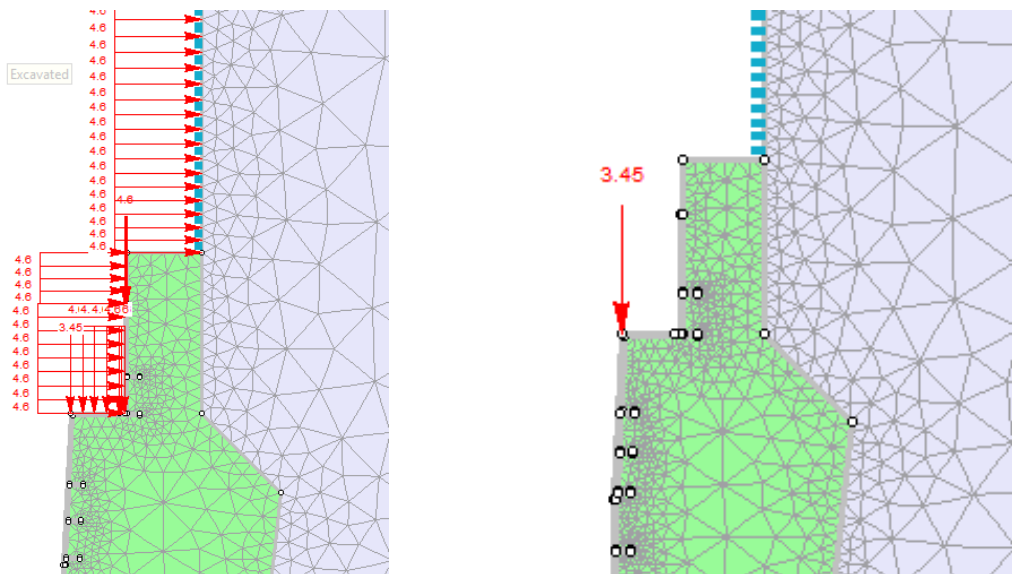


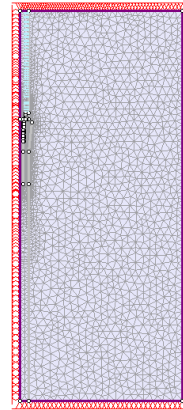
Fig.4.22 Aplicação das cargas distribuída (esquerda) e pontual (direita).

4.2.6. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

De seguida apresenta-se uma breve descrição do que foi efetuado no Phase².

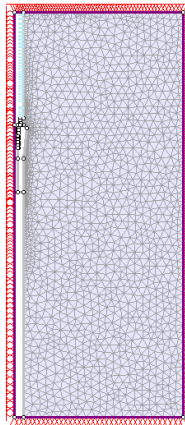
Quadro 4.3 Descrição das diversas etapas.

A Etapa1 caracteriza-se por ser a fase onde se cria todo o problema. O primeiro passo consiste na criação da geometria da modelação, atribuição das características do maciço, das condições fronteira e geração da malha de elementos finitos.

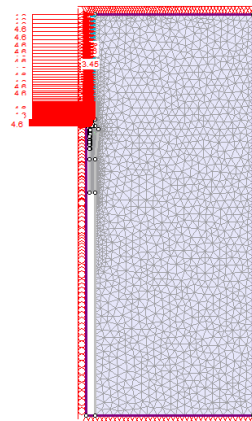


A Etapa2 (esquerda) pretende-se simular a escavação total do túnel onde o rolhão será inserido.

Já na Etapa3 (direita), encontra-se representada a betonagem do rolhão e do revestimento do túnel em carga, assim como, a colocação da blindagem.



Por último, na Etapa4 aplicam-se as cargas a que o rolhão e o túnel estarão sujeitos. Neste caso, uma carga distribuída de 4.6 MPa e uma pontual de 3.45MN/m.



Mais uma vez, como no caso de estudo anterior, ao longo das análises serão referidos se os resultados apresentam a influência de todas as Etapas, ou seja, se é referente à Etapa1 ou se apenas pretende demonstrar os incrementos que a aplicação da carga causa nos resultados. Neste último, aparecerá uma referência à Etapa3.

4.3. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Feita a introdução ao reforço de potência de Venda Nova III, temos que o nosso caso de estudo estará relacionado com o túnel em carga próximo do desarenador, zona onde será instalado um rolhão.

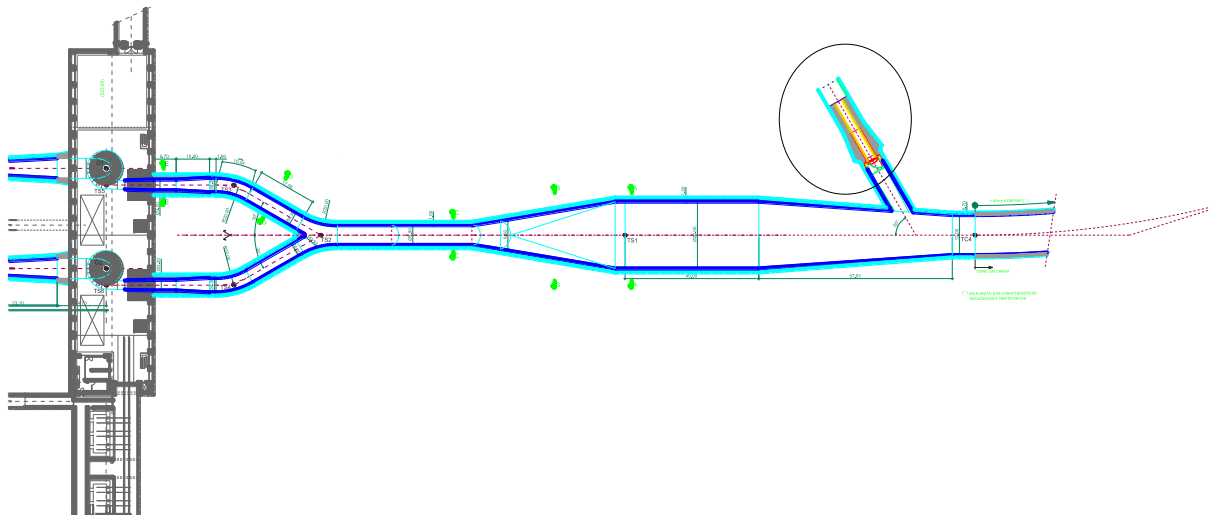


Fig.4.23 Localização esquemática do rolhão [21].

Deste modo, para a geometria já definida em 4.2.2 pretende-se efetuar 4 análises: a primeira consiste em aferir qual a influência que a introdução da blindagem provoca no rolhão. Assim, iremos analisar o acréscimo da tensão principal máxima, a deformada da estrutura, os deslocamentos e as tensões normal e tangencial ao longo do contacto maciço/betão.

Na segunda, pretendemos comparar o comportamento do rolhão blindado inserido em maciços com características distintas. As características utilizadas para os maciços serão as já definidas em 4.2.1, sendo que utilizaremos o Maciço 1 e o Maciço 3. Iremos analisar os deslocamentos (ref. Etapa 3), a plastificação a que o maciço fica sujeito (ref. Etapa 1), e se há ou não alteração das tensões desenvolvidas ao longo do contacto maciço/betão. Para estas duas primeiras análises o rolhão irá ser simulado com um comprimento de 30m.

Já na terceira análise, definimos como objetivo averiguar qual a influência do comprimento do rolhão no comportamento do mesmo. Foram ensaiados quatro valores, para o comprimento do rolhão, variando entre 30 e 15 m. A comparação terá por base a análise dos acréscimos na tensão principal, das tensões normal e tangencial e por fim dos deslocamentos, ao longo do contacto maciço/betão.

Por último, pretende-se fazer uma abordagem diferente. Como foi exposto no Capítulo 2, a escola Norueguesa apresentam uma relação entre a carga hidráulica aplicada, Δh , e o comprimento do rolhão. Deste modo, pretendemos calcular o comprimento do rolhão por este meio e estudar duas geometrias possíveis. A primeira geometria é a que tem vindo a ser analisada, apresentando uma secção troncocônica quebrada, e a segunda apresenta-se com um desenvolvimento cilíndrico e constante em todo o comprimento. Para efetuar a comparação dos dois casos iremos recorrer à análise de tensões e às zonas plastificadas ao longo da superfície de contacto entre o betão e o maciço.

4.4. ANÁLISE DE RESULTADOS 1

Esta primeira modelação apresenta como objetivo constatar qual a influência da blindagem na estrutura. Nunca é de mais referir, que iremos analisar o acréscimo na tensão principal máxima (ref. Etapa 3), a deformada, os deslocamentos (ref. Etapa 3) e as tensões normal e tangencial (ref. Etapa 1), ao longo do contacto maciço/betão.

A imagem que se segue (Fig.4.24) apresenta os resultados obtidos para o acréscimo da tensão principal máxima.

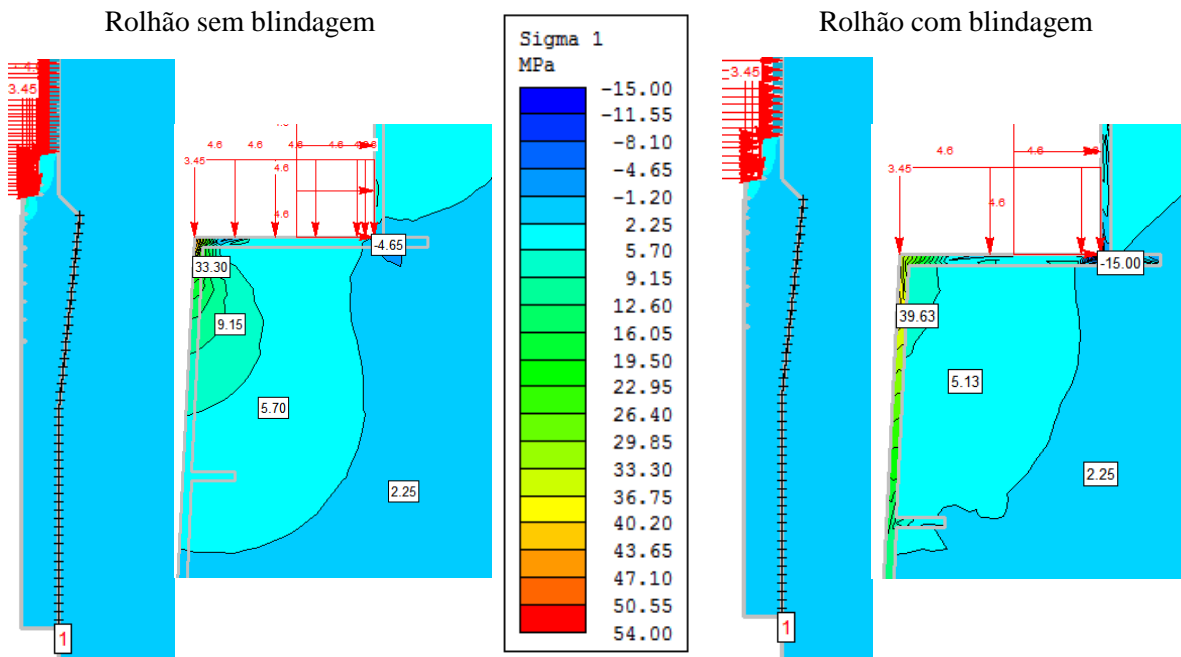


Fig.4.24 Comparação do acréscimo da tensão principal máxima e pormenores.

Da observação da Fig.4.24 verifica-se, quanto ao maciço rochoso, que não se registam alterações sensíveis significativas. No entanto, quando nos focamos na zona de aplicação das cargas constata-se que com a blindagem há um alívio das tensões instaladas no betão em detrimento da instalação de esforços na mesma.

Os acréscimos nas tensões principais máximas instaladas no rolhão sem blindagem, variam entre 35MPa e 2.25MPa, enquanto que no rolhão com blindagem, regista-se um valor máximo de aproximadamente 40MPa na blindagem, sendo que as tensões instaladas no betão passam a variar entre 5 e 2.25 MPa.

Também é possível constatar, quanto ao rolhão sem blindagem, que o mesmo apresenta uma configuração típica associada ao desenvolvimento de superfícies de rotura (Fig.4.24). Já no que respeita à deformada da estrutura, quando analisamos o ponto onde existe maior concentração de carga é perceptível que sem a blindagem o rolhão é muito mais deformável (Fig.4.25).

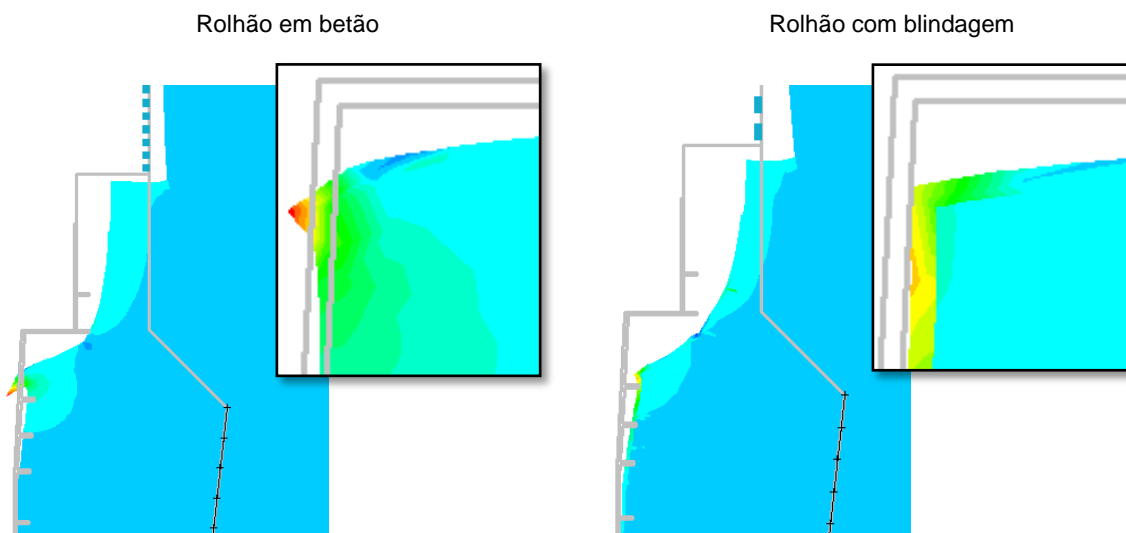


Fig.4.25 Deformada do rolhão.

Passando agora à análise dos deslocamentos (Fig.4.26) e das tensões instaladas na superfície de contacto betão/maciço (Fig.4.27) podemos aferir que o facto de termos ou não blindagem não introduz mudanças significativas.

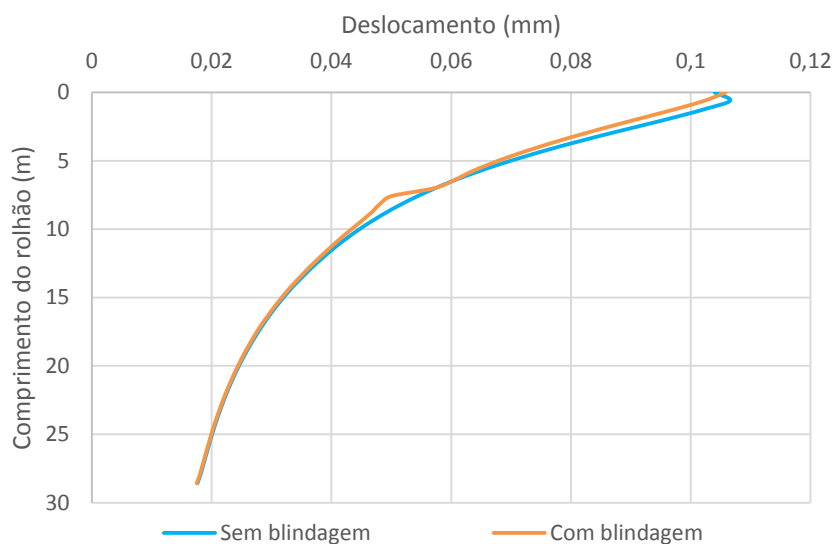


Fig.4.26 Deslocamentos dos rolhões, sem e com blindagem.

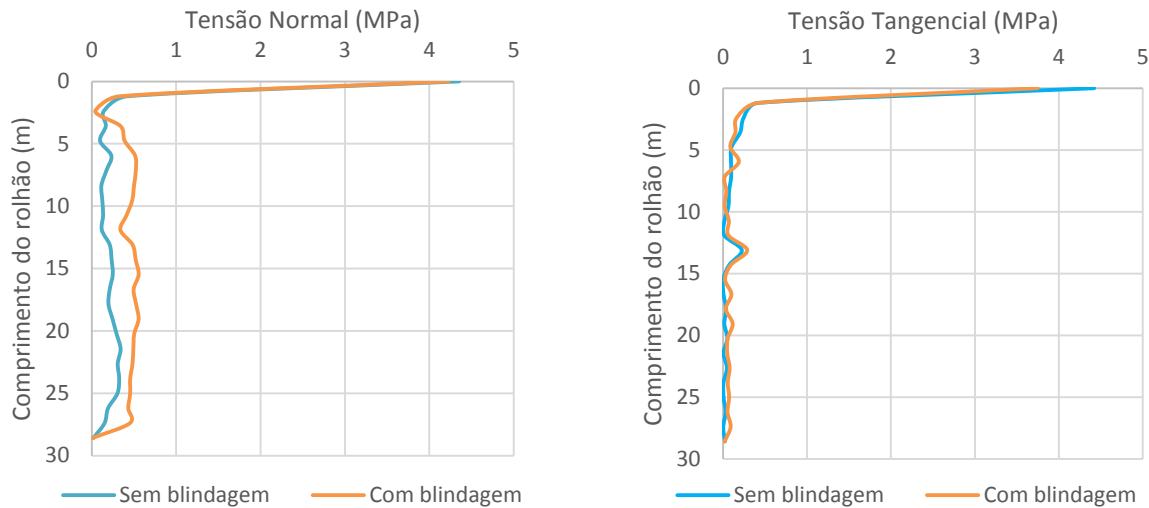


Fig.4.27 Tensão Normal e Tangencial, sem e com blindagem.

Desta análise podemos concluir que a blindagem não apresenta nenhuma função estrutural significativa. Confirma-se assim o pressuposto na modelação, de que o uso da blindagem apenas está relacionado com o facto de ser necessário ter uma porta estanque, para acesso ao circuito hidráulico em carga e garantir a estanquidade do rolhão.

4.5. ANÁLISE DE RESULTADOS 2

Para um rolhão com blindagem, pretende-se modelá-lo para maciços com características distintas, Maciço 1 e Maciço 3. As características usadas para definir os maciços são as expressas em 4.2.1.

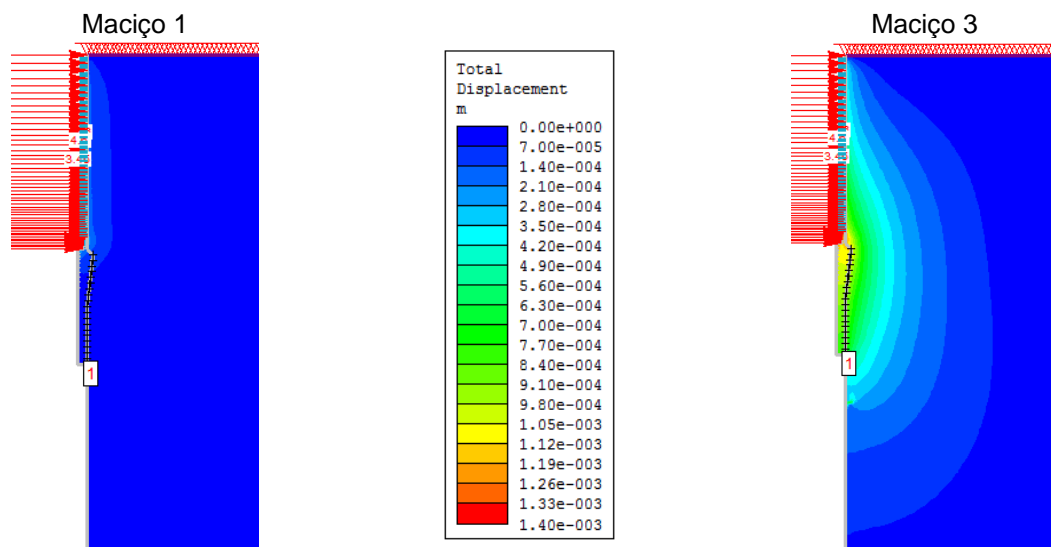


Fig.4.28 Deslocamentos para o pior e para o melhor maciço.

Observando a Fig.4.28, podemos atestar que para além dos deslocamentos (ref. Etapa3) apresentarem valores mais elevados para a situação do Maciço 3, o mesmo apresenta deslocamentos que evidenciam uma tendência para a formação de figuras de rotura características. Estas superfícies poderão por em causa a estabilidade e segurança do rolhão, uma vez que envolvem toda a extensão do rolhão.

Quanto à zona plastificada (Fig.4.29) mostra-se que é mais extensa na situação do Maciço 3, o que está de acordo com as características do maciço, uma vez que apresenta parâmetros de resistência menores.

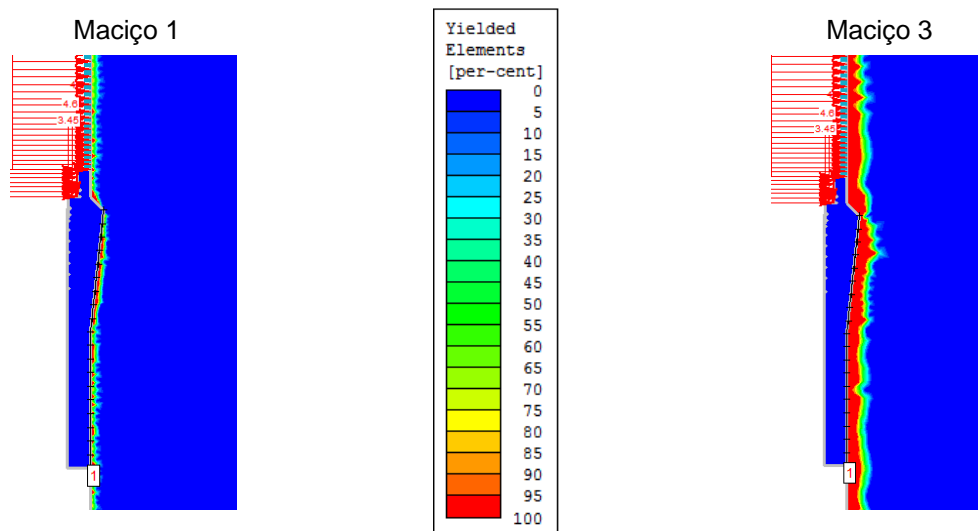


Fig.4.29 Plastificação dos maciços 1 e 3.

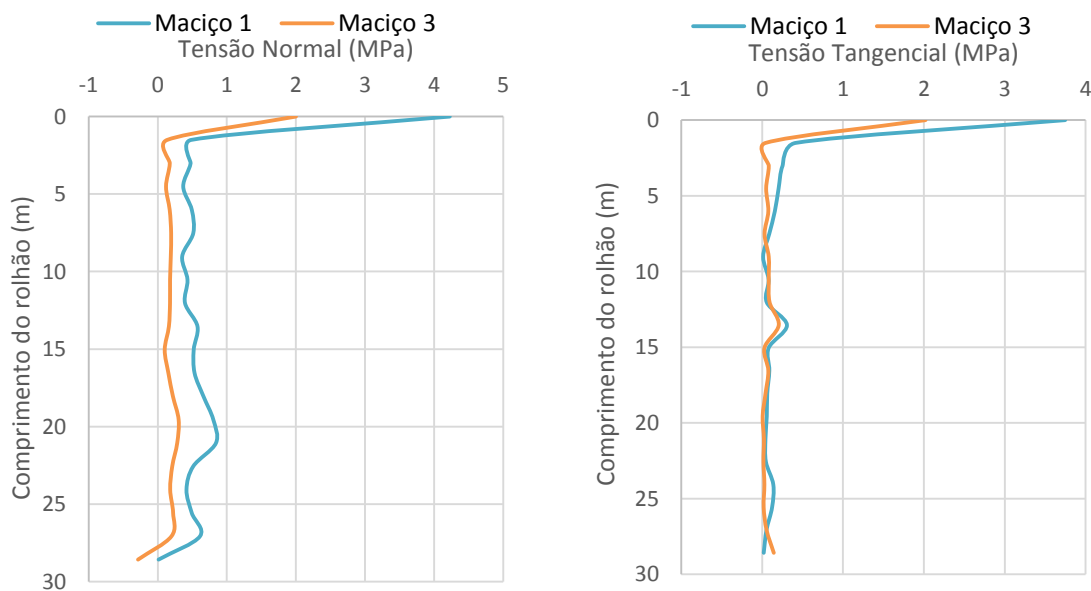


Fig.4.30 Tensões normal e tangencial dos maciços.

Por último, a avaliação das tensões no contacto maciço/betão (Fig.4.30), leva-nos a constatar que quanto às tensões normais o Maciço 3 apresenta valores mais baixos. No entanto, quando analisamos a tensão tangencial verifica-se que as curvas apresentam uma tendência muito similar.

Desta análise podemos concluir que as características resistentes afetam de forma significativa os deslocamentos e as zonas sujeitas a plastificação. No entanto, nas tensões normais e tangenciais esta influência não é preponderante (Fig.4.30).

4.6. ANÁLISE DE RESULTADOS 3

Com esta terceira análise, pretendemos aferir qual a influência do comprimento do rolhão no comportamento do maciço e do betão, assim como, nas tensões normais e tangenciais instaladas ao longo do contacto betão/rocha (ref. Etapa1). Supondo o maciço com melhores características, Maciço 1.

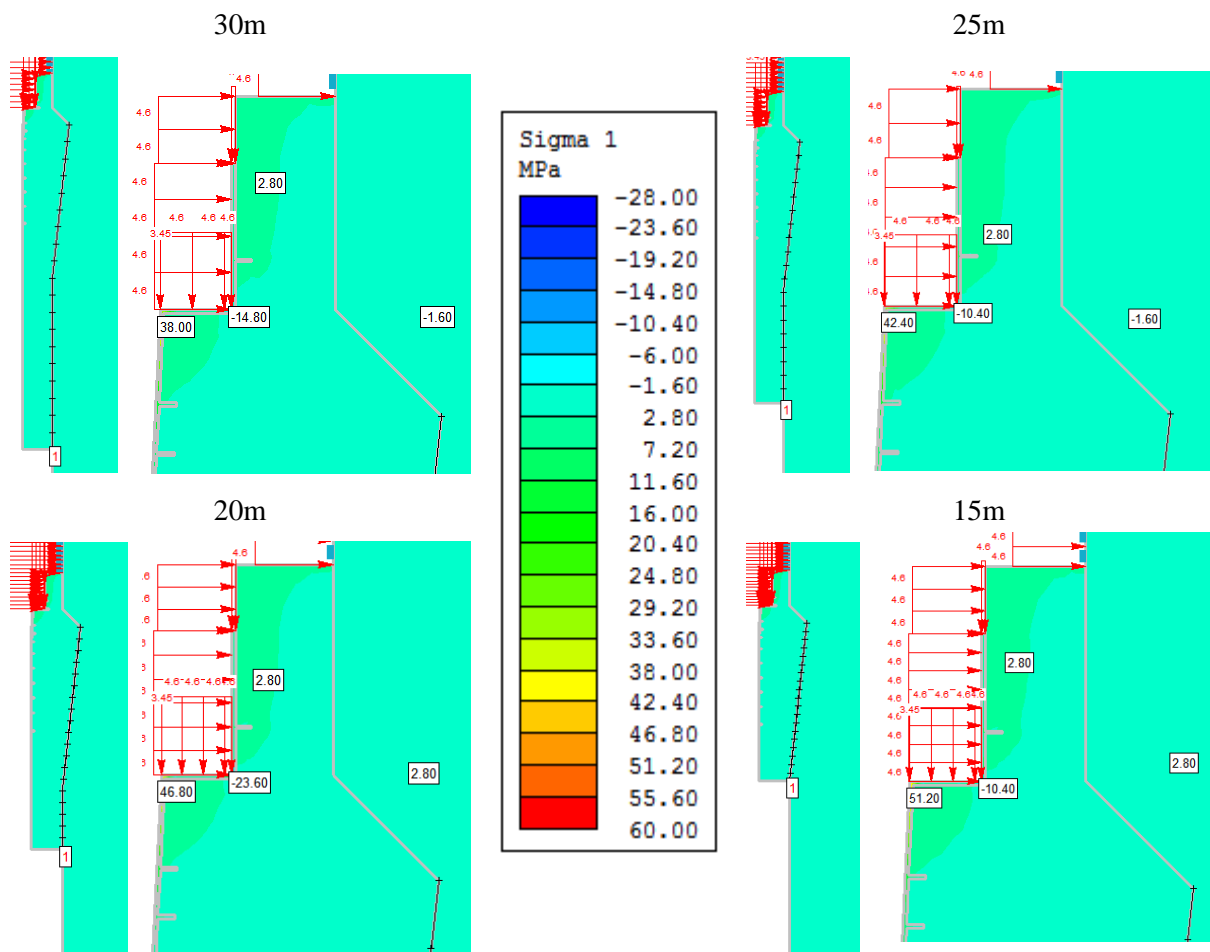


Fig.4.31 Comparação do acréscimo da tensão principal máxima, $\Delta\sigma_1$.

Pela observação da Fig.4.31, onde verificamos os acréscimos de σ_1 tendo como referência a Etapa3, podemos concluir que a diminuição do comprimento do rolhão provoca um acréscimo na tensão instalada na blindagem. Há um aumento gradual, que no ponto mais carregado da estrutura, varia entre os 38MPa, para os 30m de comprimento, e os 51.20MPa para os 15m.

Quanto ao que se sucede no maciço, numa primeira fase apresenta um valor que ronda os 1.60MPa (descompressão) e que com a diminuição do comprimento evolui para 2.80MPa (incremento da compressão).

Por último, quando temos presentes as tensões normal e tangencial (Fig.4.32) concluímos que independentemente do comprimento do rolhão as curvas apresentam a mesma tendência. Focando as tensões normais (gráfico da esquerda) e de um modo geral, todas as curvas se iniciam por volta dos 4MPa. O valor da tensão normal decresce no primeiro metro do rolhão, mantendo-se com alguma regularidade no restante comprimento. Para a solução com 30m apresenta um valor médio de 0.50MPa, para os 25m de 0.30MPa, já nos 20m o valor é de 0.25MPa e por fim para os 15m ronda os 0.20MPa.

Neste três últimos comprimentos, o facto do valor médio ser muito próximo pode levar a uma interpretação gráfica de que as curvas são coincidentes. No entanto, isto não é verdade.

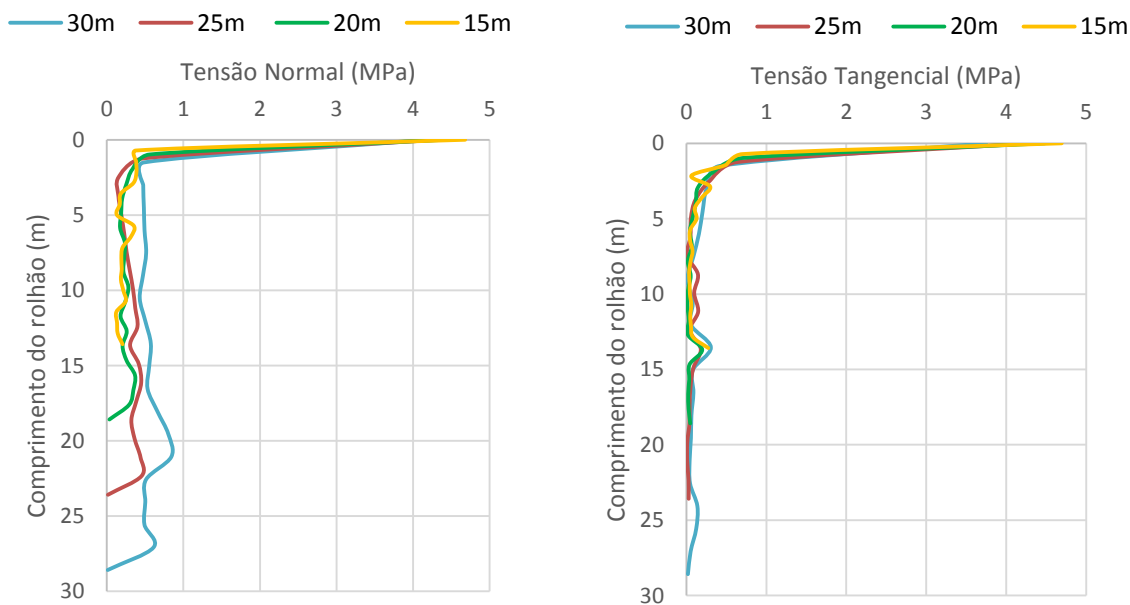


Fig.4.32 Tensão Normal e Tangencial.

Passando à tensão tangencial (gráfico da direita), também apresenta um valor máximo no início de 4MPa e decresce rapidamente nos primeiros 1.5m. Após esta diminuição acentuada, as curvas apresentam-se praticamente coincidentes e para todos os comprimentos o valor médio da tensão tangencial é de 0.10MPa.

Conciliando agora as duas tensões é possível concluir-se que os primeiros metros do rolhão são os mais importantes para resistir à carga aplicada. A partir dos 15-20m o rolhão deixa de apresentar

função estrutural, sendo que poderá apresentar um carácter mais relacionado com o controle da percolação.

Por último, uma análise dos deslocamentos (Fig.4.33) tendo como referência a Etapa3, mostra que os mesmos aumentam na medida em que diminuimos o comprimento do rolhão. No entanto, estas diferenças não são significativas uma vez que estamos a falar de centésimas de milímetro.

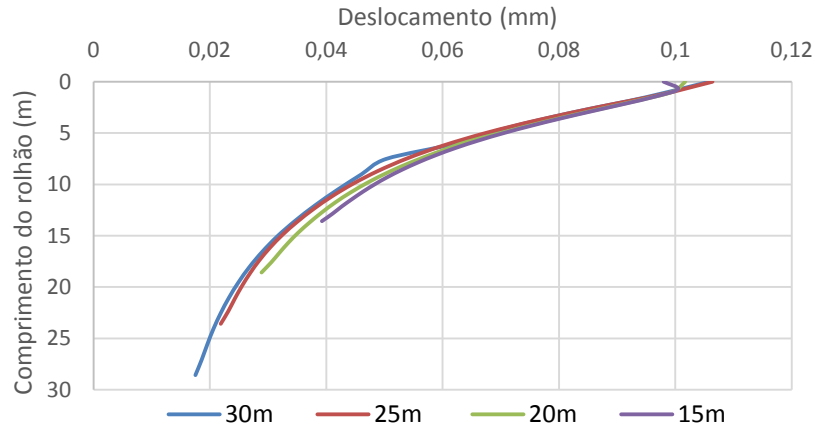


Fig.4.33 Deslocamentos.

4.7. ANÁLISE DE RESULTADOS 4

Esta última análise prende-se com conceitos já explorados no Capítulo 2. Voltando um pouco atrás e no que foi desenvolvido pela escola Norueguesa, temos que eles relacionam o comprimento do rolhão com a carga hidrostática aplicada. Indicam mesmo que o comprimento do rolhão deve andar entre os 3 e os 5% da carga hidrostática. Deste modo, o comprimento do nosso rolhão deverá variar entre:

$$0.03 \cdot \Delta H < l < 0.05 \cdot \Delta H \Leftrightarrow 0.03 \cdot 469 < l < 0.05 \cdot 469 \Leftrightarrow 14 \text{ m} < l < 23.5 \text{ m} \quad (4.5)$$

Assim definiu-se que o rolhão, que pretendemos estudar, terá 20m de comprimento e será modelado tendo por base o Maciço 1. Quanto à secção, no primeiro caso será idêntica à analisada anteriormente, adotando-se tal comprimento. O segundo representa um rolhão com forma cilíndrica, de secção constante ao longo do seu desenvolvimento (Fig.4.34).

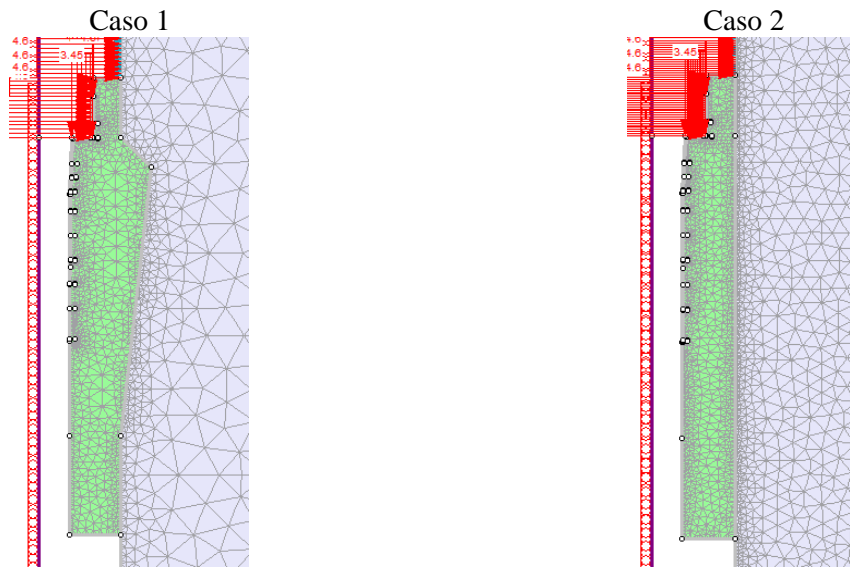


Fig.4.34 Geometrias em análise.

Procedendo à comparação dos dois casos no que respeita à tensão principal máxima (ref. Etapa1), temos que no Caso 1, σ_1 apresenta uma variação entre -1MPa e 15MPa. Já no Caso 2, a tensão principal máxima no maciço mantém-se contante, rondando os 7MPa.

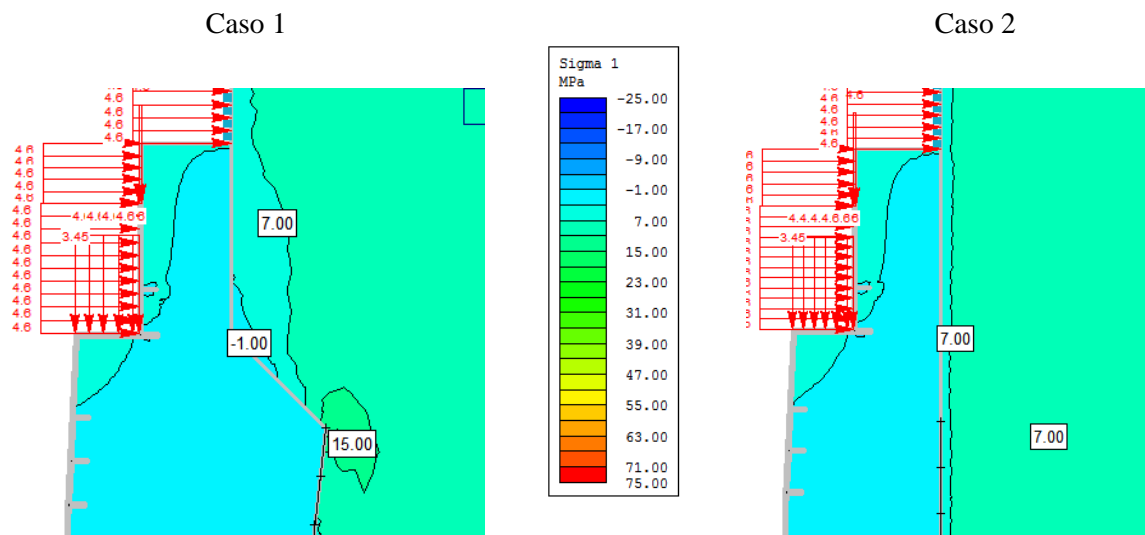


Fig.4.35 Tensão principal máxima, na zona mais significativa.

Analisando agora as zonas sujeitas a plastificação (Fig.4.36; ref. Etapa1), constata-se que no Caso 1 a zona é ligeiramente mais extensa. No entanto, é importante referir que esta plastificação surge devido à escavação do túnel e não da aplicação das cargas a que o rolhão está submetido.

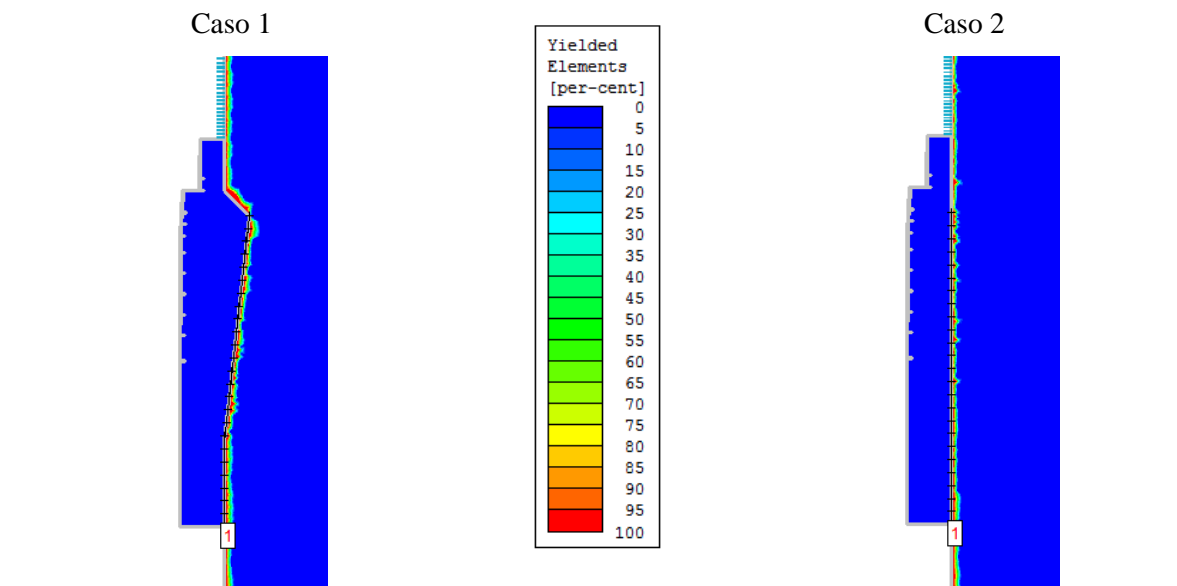


Fig.4.36 Zonas de plastificação.

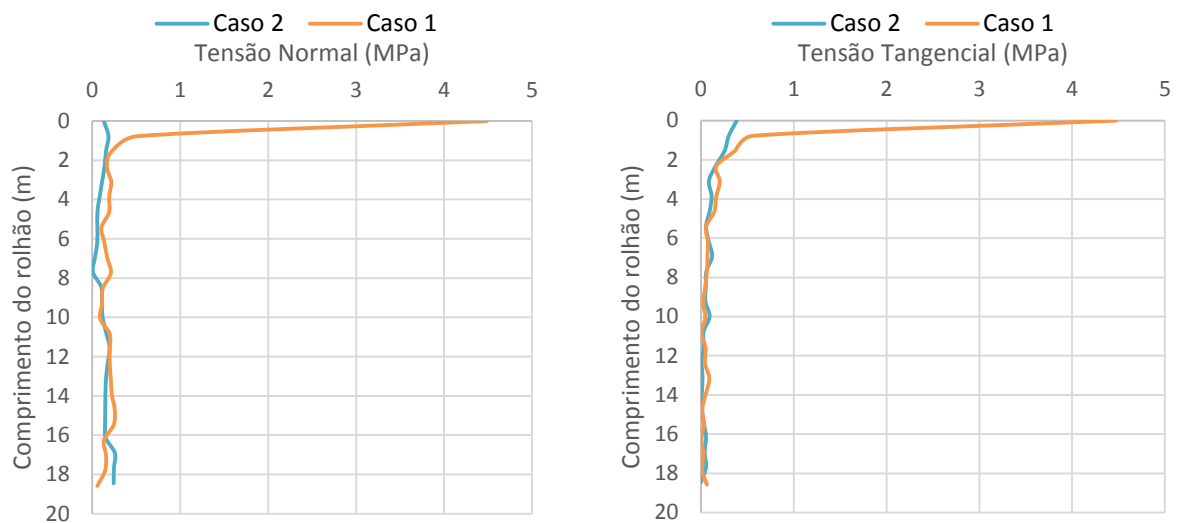


Fig.4.37 Tensões Normal e Tangencial dos dois casos.

Passando à análise das tensões (Fig.4.37; ref. Etapa 1) e dos deslocamentos (Fig.4.38; ref. Etapa3), podemos concluir, quanto às tensões, que no Caso 2 é onde registamos valores mais baixos. A média das tensões normais, para este caso, ronda 0.14MPa e para as tensões tangenciais aproxima-se dos 0.08MPa. Também é possível constatar que a partir dos 8m as tensões, normais e tangenciais, deixam de ser significativas.

Já para os deslocamentos, há diferenças nítidas no início do rolhão, sendo que o Caso 2 apresenta maior valor. No entanto, aproximadamente após os 4m o mesmo não se verifica, passando as curvas a apresentar um desenvolvimento similar.

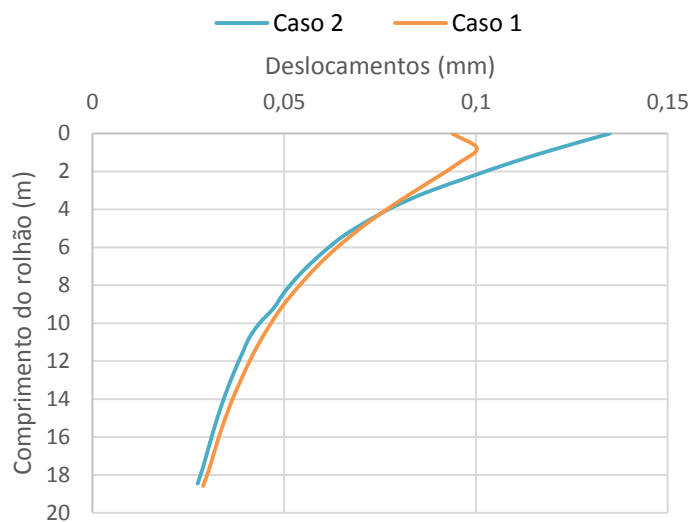


Fig.4.38 Deslocamentos para os dois casos.

Podemos assim concluir, que o Caso 2 representa uma boa solução a ser adotada. No entanto, seria necessário efetuar um estudo hidráulico para complementar a análise.

5

INJEÇÕES EM ROLHÕES

5.1. GENERALIDADES

A aplicação de técnicas de injeção em obras de Engenharia, dependendo de características como a geologia do terreno e da posição do nível freático, pode representar um custo elevado no projeto e uma parte essencial do mesmo.

No entanto, a escolha dos tipos de injeções a serem aplicadas depende do facto de estarmos a realizar um projeto em rocha ou em solo. Assim, é indispensável definir cada conceito: dizemos que estamos na presença de uma rocha quando temos uma formação sólida e resistente na crosta terrestre. Já de solo, quando nos deparamos com uma acumulação de partículas sólidas não consolidadas que tiveram a sua origem da degradação física e química das rochas [23].

Visto que na presente dissertação, estamos a analisar uma estrutura envolta num maciço rochoso, o tipo de injeções que pretendemos abordar são as realizadas em matriz rochosa. Ponderando parâmetros como as características geológicas, a profundidade da estrutura, a posição do nível freático e as condições de acesso a partir da superfície para os equipamentos, conclui-se qual a melhor abordagem para a realização das injeções. Queremos com isto dizer, que as mesmas poderão ser efetuadas a partir da superfície ou a partir da própria escavação. O mais comum e natural neste tipo de obras, é que sejam efetuadas a partir da própria escavação, visto não ser possível alcançar a profundidade a que a maior parte das estruturas se encontram devido, por exemplo, à presença de outras estruturas enterradas.

Focando-nos agora nas estruturas em causa, nomeadamente os rolhões, a necessidade de aplicação de injeções surge intrinsecamente ligada ao facto de se querer garantir não só a sua estanquidade mas também a do maciço envolvente. Não nos podemos esquecer que o facto de não controlarmos de fugas de água, poderá se traduzir em perdas de produção de energia, que a longo prazo se manifesta em prejuízos. A afluência de caudais elevados faz com que seja necessário que haja bombeamento da água o que acarreta custos elevados. Já no caso de termos gradientes hidráulicos elevados, poderá haver uma erosão excessiva ou até mesmo destruturação do maciço que a longo prazo se torna crítico para a estabilidade do conjunto maciço/estrutura.

5.2. APLICAÇÃO DE INJEÇÕES EM ROLHÕES

Os trabalhos de injeção dependem muito do conhecimento e da experiência de quem os executa. Deste modo, os mesmos deverão ser executados por empresas especializadas no setor e que demonstrem bons resultados na aplicação desta tecnologia. Esses resultados poderão ser demonstrados através da apresentação de projetos já concretizados [24].

Esta tecnologia consiste na injeção, com alguma pressão, de caldas de cimento ou outro tipo de fluido, como por exemplo resinas sintéticas. Tem como objetivo o preenchimento de discontinuidades, zonas vazias, cavidades e outros tipos de irregularidades com importância para desempenho do maciço.

Não nos podemos esquecer, que a aplicação das injeções em rolhões tem como objetivo primordial, garantir a estanquidade dos mesmos e do maciço em redor. Importa assim definir, quais os pontos mais susceptíveis da ocorrência de percolação. Usualmente, as fugas de água podem ocorrer através [2]:

- ✓ Do contacto betão-maciço:

O tratamento desta zona é sempre necessário, frequentemente no contacto betão/maciço é crucial o preenchimento das falhas resultantes da retração do betão, assim como, da descompressão do maciço. Não devemos descurar as zonas no topo do rolhão, que poderão apresentar vazios, por dificuldade da betonagem em preencher toda a secção do rolhão;

- ✓ Do betão:

As fugas através do betão poderão ser devidas à elevada porosidade do mesmo, à existência de juntas de betonagem e à existência de fissuras. Estas fissuras poderão ser causadas pela pressão que a água exerce no rolhão, pelo efeito de retração do betão ou ainda devido às tensões que o maciço transmite para a estrutura;

- ✓ Do próprio maciço:

Quando a percolação ocorre através do maciço, o mais frequente, é que a mesma ocorra nas discontinuidades naturais ou induzidas pelo processo de escavação;

- ✓ Por último, as fugas poderão ocorrer na zona do contacto entre o betão e a blindagem, caso esta exista.

Todavia, poderão existir casos onde se proceda ao tratamento de todos estes pontos fundamentais e outros em que não seja necessário ou até se venham a tratar zonas não especificadas anteriormente.

Visto que é vasta a literatura sobre o assunto, na presente dissertação, daqui por diante, iremo-nos referir ao que tem sido a prática comum realizada nas obras da EDP. Iremos apresentar dois casos: Baixo Sabor e Venda Nova III, sendo que o Baixo Sabor representa uma situação geral e comum de aplicação de injeções em rolhões, enquanto que Venda Nova III irá ser caracterizada por algumas particularidades.

5.3. O CASO DO BAIXO SABOR

No caso do Baixo Sabor, as injeções de rolhões estão divididas em dois tipos: o primeiro consiste na aplicação de injeções de colagem e ligação e o segundo, compreende as injeções de consolidação e impermeabilização. Estas injeções são normalmente realizadas após a betonagem do rolhão.

Começando pelas injeções de colagem e ligação, tipo 1, têm como objetivo o tratamento da zona de contacto betão/maciço. Estas realizam-se através de furos curtos que penetram 30 a 50cm na rocha, localizados na zona de fecho da abóbada de cada perfil, após o que se deverá proceder à respetiva injeção a baixa pressão, normalmente $<0.2\text{MPa}$.

EM TODOS OS PERFIS NOS FUROS POSICIONADOS NO FECHO DA ABÓBADA DE CADA PERFIL

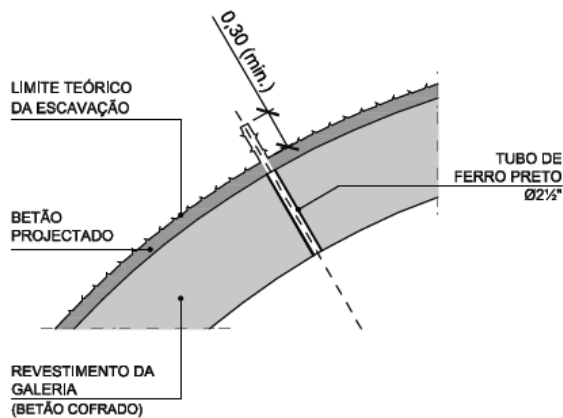


Fig.5.1 Aplicação das injeções do tipo 1 [24].

Nestas injeções são utilizadas caldas grossas, ricas em cimento, podendo-se mesmo utilizar argamassas caso se detetem absorções elevadas no maciço. Em cada perfil, a injeção deverá iniciar-se pelos furos emboquilhados a cotas mais baixas, devendo um furo a cota mais elevada passar de imediato a ser injetado quando se verifique a ressurgência de calda, proveniente da injeção de um furo situado a cota inferior.

Outros cuidados são tidos em conta, tais como, a abertura dos furos de dois perfis subsequentes antes de se iniciar a injeção. Para além disso, caso se verifique a ressurgência de calda nos furos de um perfil, quando está em execução a injeção do perfil que o antecede, os mesmos devem ser injetados em simultâneo.

Passando às injeções do tipo 2, injeções de consolidação e impermeabilização, estas têm como objetivo tratar o maciço envolvente. Como já foi mencionado, as injeções de consolidação permitem o preenchimento de discontinuidades, zonas vazias, cavidades e outros tipos de irregularidades com importância para o desempenho do maciço. Já as de impermeabilização, como o próprio nome indica, têm como objetivo criar uma barreira à percolação da água.

Este tipo de injeções, onde se utilizam caldas mais fluídas, são executadas ao longo de todo o troço do rolhão e, por vezes, no troço de túnel a montante deste. Realizam-se em todos os furos de cada perfil, com uma distribuição regular ao longo do perímetro, obrigando para tal à reperfuração dos furos da abóbada, por já terem sido utilizados nas injeções de colagem e ligação.

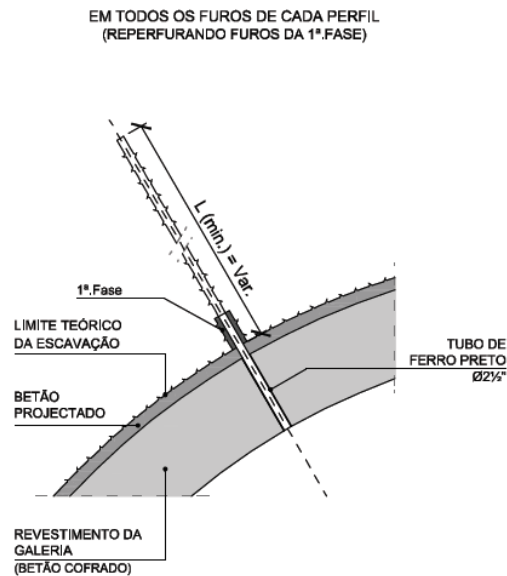


Fig.5.2 Aplicação de injeções do tipo 2 [24].

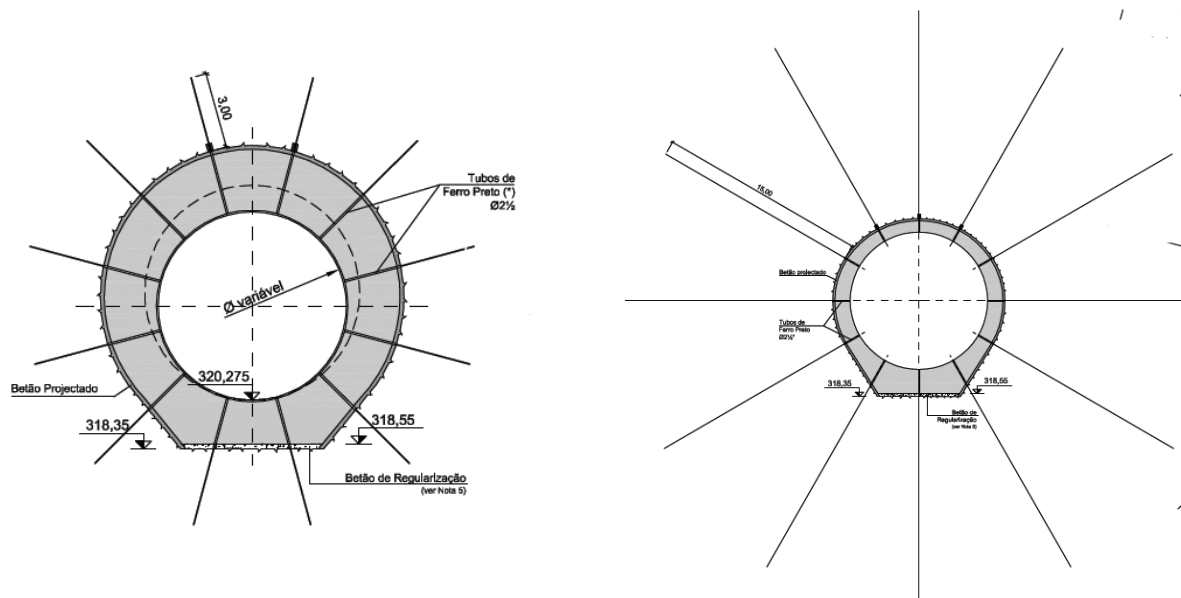


Fig.5.3 Perfis tipo de injeção, para injeções de consolidação e impermeabilização [24].

5.4. O CASO DE VENDA NOVA III

No caso de Venda Nova III [25] para além das injeções, como as referidas para o caso do Baixo Sabor, projetaram-se outros tipos de injeções como complemento do tratamento. Para esse rolhão, com blindagem e sujeito a uma pressão elevada, as injeções foram divididas em duas fases: a primeira corresponde a aplicação das mesmas antes da betonagem do rolhão, onde se procede ao tratamento de uma auréola do maciço, afastada do rolhão. Por sua vez, a segunda corresponde a uma fase posterior à betonagem do mesmo. O facto de se efetuarem injeções antes da betonagem relaciona-se meramente com a estratégia adotada pela EDP para o cumprimento de prazos. De seguida apresenta-se a sequência de operações projetada.

5.4.1. ANTES DA BETONAGEM DO ROLHÃO

Antes da betonagem do rolhão, procede-se ao tratamento da zona correspondente ao troço blindado. Para efetuar este tratamento são executadas injeções, numa auréola exterior, de consolidação e impermeabilização.

Assim, as injeções são materializadas (Fig.5.4), em correspondência com o troço a blindar, em perfis equidistantes ao longo do perímetro da secção. Os furos são injetados com calda de cimento nos seus metros finais a uma pressão a rondar os 5MPa. O trecho remanescente do furo, aproximadamente os últimos 3 metros junto à face de escavação, é injetado a baixa pressão, inferior a 0.5MPa. Para se obter um bom resultado, à medida que nos aproximávamos da face de escavação, injetam-se caldas cada vez mais grossas.

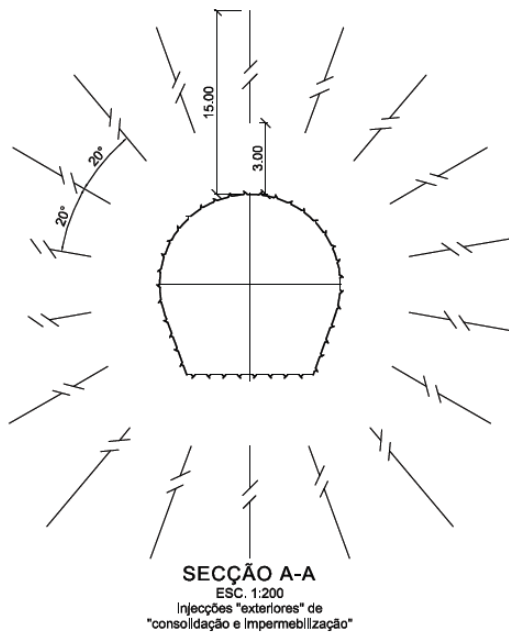


Fig.5.4 Injeções exteriores de consolidação e impermeabilização [26].

Após a realização destas injeções e antes de se efetuar a betonagem do rolhão precede-se à preparação da injeção do contacto. Deste modo, colocam-se e fixam-se à rocha os circuitos de tubos *injeto* e respetivos tubos coletores através dos quais se fará a injeção do contacto betão/rocha. É importante referir que os tubos *injeto* são uns tubos perfurados (com micro poros), bastante permeáveis que permitem injetar fluidos.

Nesta etapa, também se procede à fixação dos tubos injeto à face da blindagem, na zona de contacto com o betão, para que posteriormente seja possível realizar o tratamento do contacto blindagem/betão. Por último fixam-se os tubos de ferro preto que definirão os perfis transversais de injeção e a furação da blindagem.

5.4.2. APÓS A BETONAGEM DO ROLHÃO

Após a betonagem do rolhão, os tratamentos com injeções são divididos em 3 tipos:

1. Injeções de colagem e ligação;
2. Injeções de consolidação e impermeabilização;
3. Injeções de impermeabilização das superfícies de contacto.

As injeções do tipo 1 são em tudo semelhantes as descritas no caso do Baixo Sabor (5.3). Contudo, as do tipo 2 dividem-se em duas fases. Numa primeira, efetuam-se injeções com calda de cimento, sendo que na segunda são utilizadas resinas sintéticas. Deste modo, será descrito o procedimento adotado para ambas as fases:

- ✓ Fase 1 – Injeções com calda de cimento [25]:

Os perfis a injetar com calda de cimento localizam-se ao longo do troço não blindado do rolhão e no troço de túnel a montante do mesmo. Nos perfis do troço de túnel a montante do rolhão, com o intuito de evitar possíveis danos no revestimento de betão durante o processo de injeção, será imposto à calda, pressões mais reduzidas junta à boca do furo. No entanto, estas pressões irão crescer à medida que progredimos para o interior do maciço. Os trabalhos de injeção/furação terão a seguinte sequência:

- i. Inicialmente os furos de cada perfil apresentam um comprimento de 1m em rocha, sendo a calda injetada a uma pressão inferior a 0.5MPa;
- ii. De seguida, far-se-á a reperfuração de cada furo, prolongando-o mais 2m para o interior da rocha. Segue-se a sua injeção a uma pressão de 1MPa;
- iii. Numa terceira fase, após nova reperfuração dos furos e respetivo prolongamento de mais 2m para o interior da rocha, será injetada uma calda a uma pressão de 3MPa;
- iv. Por último, há uma nova reperfuração e prolongamento dos furos até ao comprimento final para o interior do maciço. Estes furos serão injetados em troços de 5m com uma pressão de 5MPa.

Após as injeções com calda de cimento estarem executadas, procede-se à realização do tratamento com resina sintética.

- ✓ Fase 2 – Injeções com resinas sintéticas [25]:

Este tratamento irá ser efetuado nos furos disposto em perfis, localizados no troço do túnel a montante do rolhão, no troço blindado e no troço não blindado.

SISTEMA DE INJEÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO

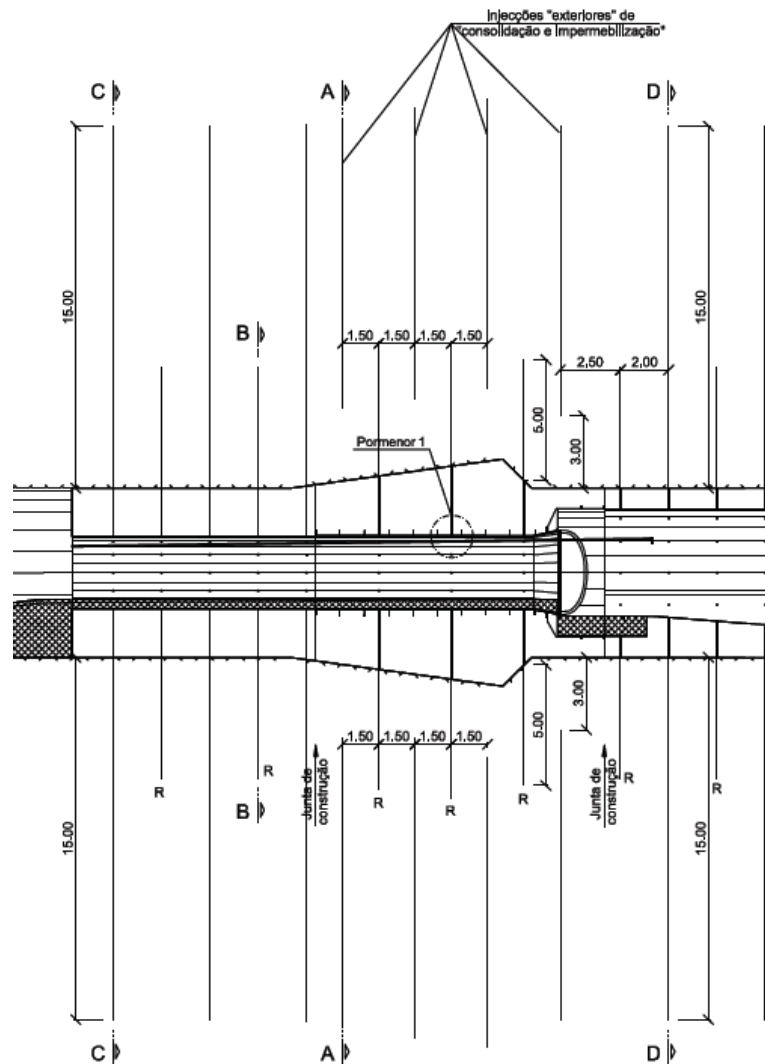


Fig.5.5 Localização das injeções com resinas (R) [26].

Cada um destes perfis (Fig.5.5) localiza-se entre perfis injetados, previamente, com calda de cimento. Os furos têm 5m de comprimento, e em alguns casos obriga à reperfuração dos furos da abóbada. A resina sintética é injetada a uma pressão constante em todo o furo, 1 ou 5MPa, consoante se trate de perfis no troço de túnel a montante do rolhão ou dos restantes. Para além disso, durante o processo de injeção deve ser garantido que o obturador fica posicionado no interior do revestimento do betão.

Por último, o terceiro tipo de injeções, as de impermeabilização das superfícies de contacto, é aplicado em 3 zonas: nas juntas verticais, no contacto blindagem/betão e no contacto betão/rocha.

Começando pelas injeções das juntas verticais de construção, temos que, no caso de Venda Nova III, apenas existem duas juntas verticais resultantes da construção do rolhão. A injeção destas juntas é realizada recorrendo aos tubos tipo injeto, que foram fixados à superfície do betão durante a betonagem.

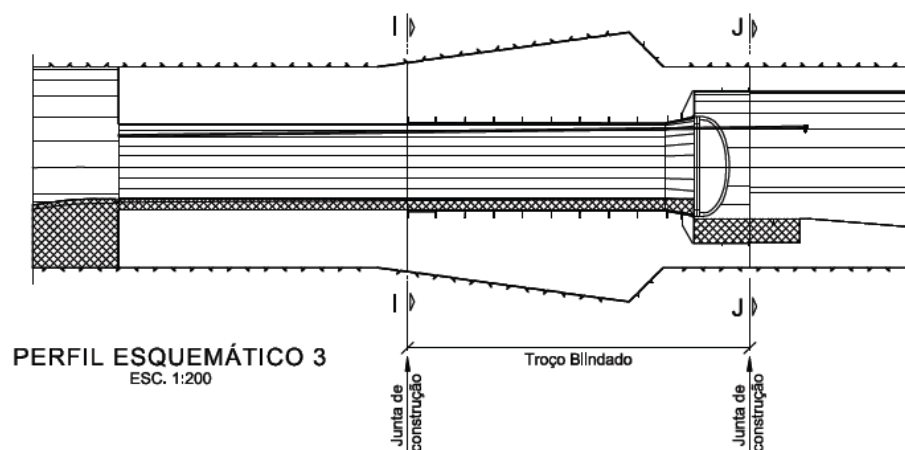


Fig.5.6 Localização das juntas verticais [26].

Assim, antes de se proceder à injeção propriamente dita, é conveniente que se teste todos os circuitos através de um ensaio prévio de injeção de água. Este procedimento tem em vista, não só verificar a operacionalidade do circuito de injeção, como também, adequar a composição da resina para a obtenção do efeito desejado. Esta mesma resina é injetada a uma pressão de 1MPa.

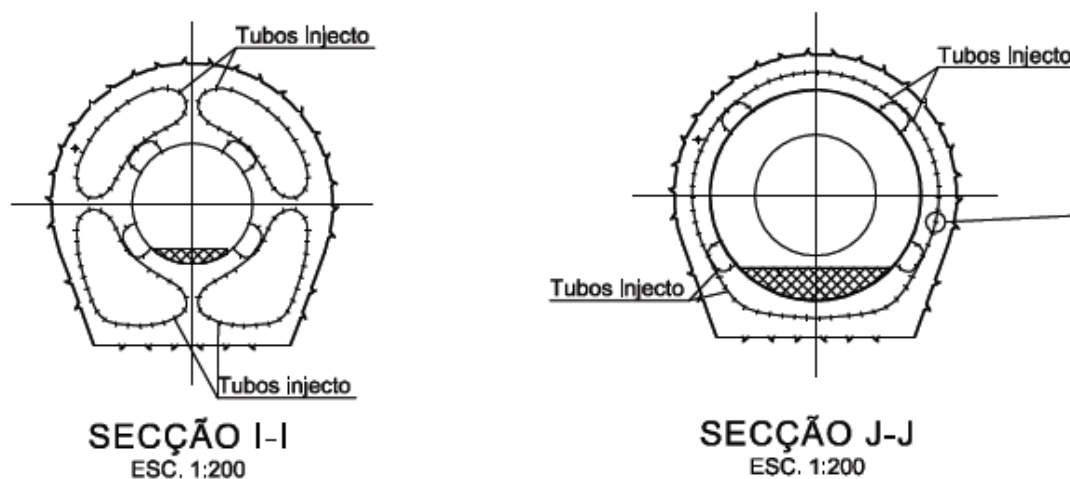


Fig.5.7 Sistema de injeção das juntas verticais [26].

Passando as injeções do contacto blindagem/betão, temos que antes de se iniciarem estas injeções, é importante recorrer-se a uma inspeção prévia da chapa. Esta inspeção consiste em bater na chapa, com um martelo, para identificar eventuais vazios, que deverão ser preenchidos [25].

Com base nesta inspeção abrem-se furos dispostos de forma a que, durante a injeção, a calda de cimento possa entrar por um furo, no ponto mais baixo, e o ar ou água retidos saiam por outro furo, localizado num ponto mais alto.

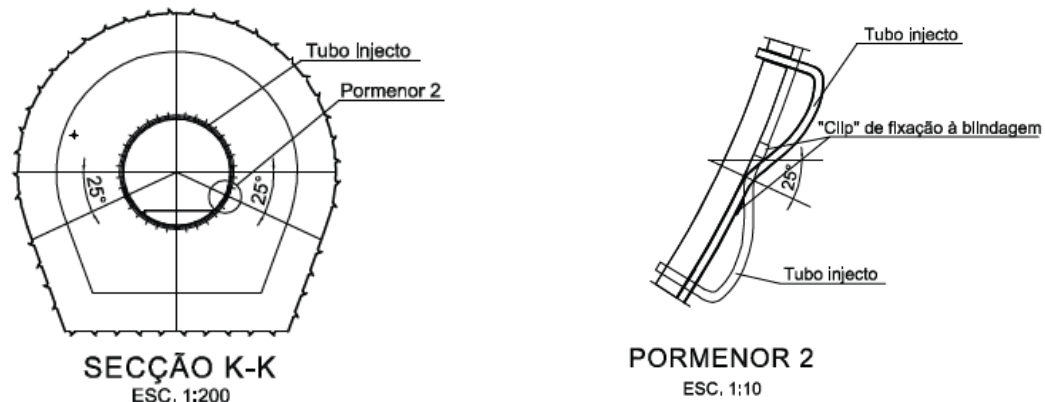


Fig.5.8 Sistema de injeção blindagem/betão [26].

Para evitar danos na chapa metálica a injeção é executada com bombas manuais, de fácil controlo de pressão, não devendo esta exceder 1MPa. Como já foi referido, em cada secção de injeção, os tubos tipo injeto são fixados à face da chapa (Fig.5.) que ficará em contacto com o betão de modo que as suas extremidades terminem em adaptadores apropriados que desembocam nos furos da blindagem.

Por fim, temos a injeção do contacto betão/rocha. Estas injeções representam uma medida adicional e de complemento às injeções de colagem e ligação. Só são executadas, caso se verifique que ainda não se atingiu os níveis de estanquidade admissíveis.

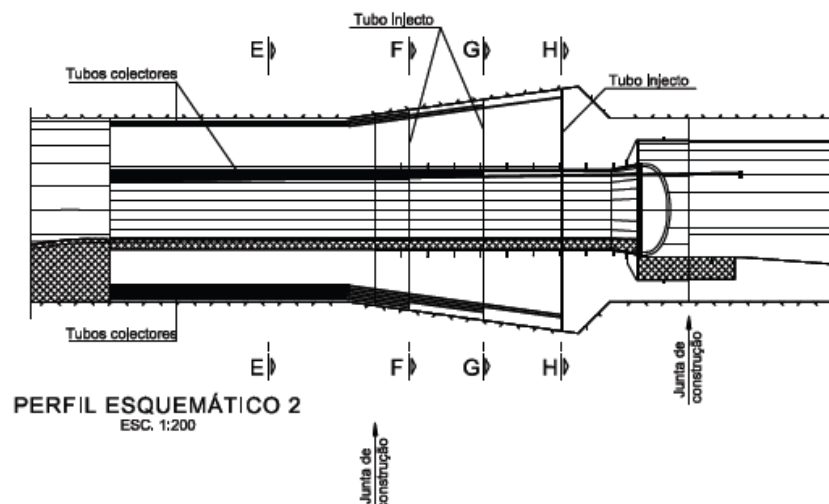


Fig.5.9 Localização de algumas secções sujeitas às injeções de contacto betão/rocha [26].

No caso de se virem a concretizar, estas injeções serão executadas após o enchimento do circuito hidráulico. Terão o intuito de garantir uma barreira adicional à passagem da água, pela zona de contacto betão/rocha, através da injeção de resinas. Para estas injeções, a cada tubo tipo injeto estará associado um par de tubos coletores metálicos que completam o circuito para a entrada e saída da resina [25].

Antes de se proceder à injeção, mais uma vez, devem ser testados os circuitos através de um ensaio prévio de injeção de água. A resina deverá ser injetada a uma pressão de 5MPa.

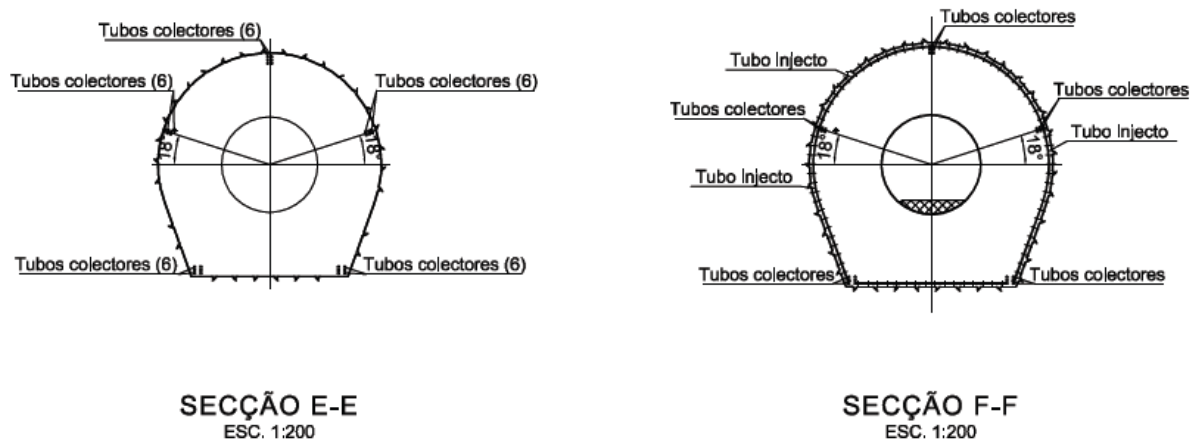


Fig.5.10 Sistema de injeção betão/rocha (Secção E-E e F-F) [26].

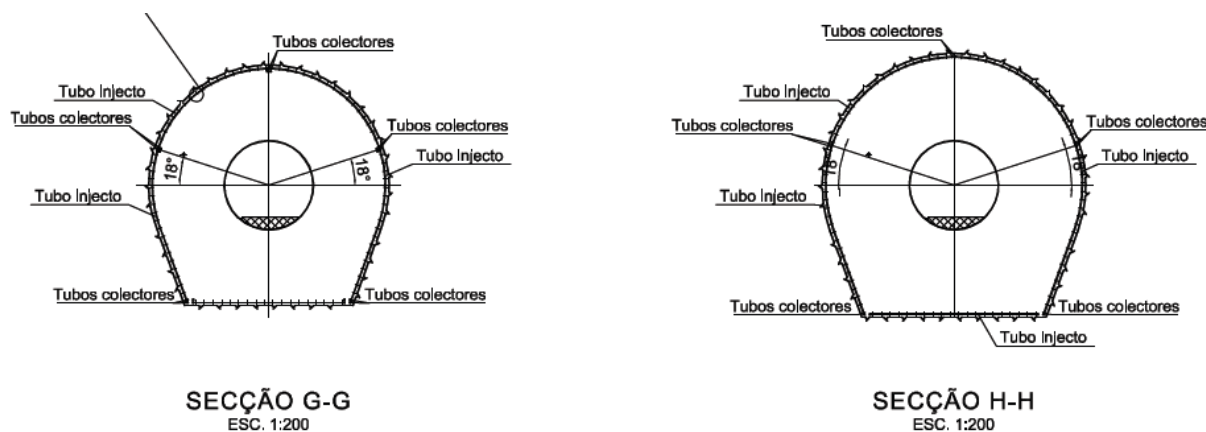


Fig.5.11 Sistema de injeção betão/rocha (Secção G-G e H-H) [26].

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No desenvolvimento desta dissertação, muitas foram as dificuldades a ultrapassar. De entre estas, destaca-se a escassez de bibliografia especializada sobre o tipo de estrutura com que se pretende promover a obturação de um qualquer túnel sob a ação duma carga hidráulica, elemento esse vulgarmente designado por rolhão, bem como a falta de informação ou de elementos de estudo que suportem o respetivo dimensionamento em obras já executadas.

Pese embora a pouca informação obtida durante a fase de pesquisa com que se iniciou o trabalho referente a esta dissertação, com o desenrolar dos estudos registou-se, a par duma perceção das condicionantes e complexidade das análises, uma crescente sensibilidade para a elevada importância do adequado dimensionamento dos rolhões no contexto das obras hidráulicas.

Neste contexto, passamos a ter uma análise mais crítica em relação a esta estrutura. Foram, em consequência, analisados casos de estudo relativos a dois aproveitamentos hidroelétricos que estão a ser atualmente desenvolvidos em Portugal. São eles, o primeiro, a obturação do túnel de derivação provisória do rio no local da construção da barragem principal do aproveitamento do Baixo Sabor e, o segundo, a obturação do túnel a partir do qual foi efetuada a escavação de parte do circuito hidráulico do reforço de potência de Venda Nova III.

Para o caso do Baixo Sabor realizamos 4 casos de estudo, dos quais já foram expostos os resultados finais. Estes estudos permitiram-nos adquirir sensibilidade quanto aos valores das tensões instaladas no contacto maciço/rolhão e também dos deslocamentos. Em face dos resultados obtidos, conclui-se que o prolongamento do rolhão através da construção de uma gola em projetos de rolhões com objetivo similar, constitui uma recomendação para futuras realizações deste tipo de estrutura.

Quanto ao caso de Venda Nova III, os estudos revelam que a utilização da blindagem é requerida pela necessidade de garantir, pelo interior do rolhão e através duma porta estanque, um acesso ao circuito em carga. Tal blindagem, para além de constituir a estrutura de suporte da porta estanque, tem essencialmente uma função de impermeabilização da superfície perimetral do vazio interior do rolhão de betão que permite o acesso até à porta.

Análises de sensibilidade efetuadas para avaliar o efeito da variação do comprimento do rolhão levaram a concluir que, do ponto de vista do comportamento mecânico, os valores propostos por

alguns autores, compreendidos entre 3 e 5% do valor da carga hidráulica, conduzem a resultados satisfatórios nos casos das soluções ensaiadas em Venda Nova III.

Assegurado o comportamento mecânico importa referir a necessidade de serem adotadas disposições construtivas que igualmente assegurem um adequado desempenho do ponto de vista hidráulico. Neste particular aspeto é feita referência ao recurso a tratamentos de injeções. Estas permitem melhorar o desempenho de zonas mais debilitadas do maciço, assim como de zonas do próprio rolhão. Contudo, as mesmas deverão ser executadas, sempre, por empresas especializadas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://www.rockscience.com/products/3/Phase2>, Abril 2013.
- [2] Auld, F.A., *Design of underground plugs*. International Journal of Mining Engineering, 1983, vol 1, pp. 189-228, Kluwer Academic Publishers.
- [3] Desenhos: Galeria de Ataque, Rolhões, Definição, Planta e corte. In *Aproveitamento hidroelétrico do empreendimento de fins múltiplos de Alqueva – Reforço de potência*, Empreitada geral de construção – Projeto de execução, EDP, 2011.
- [4] Lima, C., Menezes, J.E., Classificação de maciços rochosos. In *Apontamentos de Geologia de Engenharia*, cap 5, FEUP, 2008.
- [5] http://www.rockscience.com/hoek/corner/3_Rock_mass_classification.pdf, Maio 2013.
- [6] http://www.rockscience.com/hoek/corner/11_Rock_mass_properties.pdf, Maio 2013.
- [7] Menezes, A., Varela, F., Túnel Rodoviário Caniço-Camacha, Projeto em Geotecnia, FEUP, 2005.
- [8] Broch, E., *Sharing Experience with concrete plugs in high-pressure tunnels*. HRW, September 1999.
- [9] Garrett, W.S.; Pitt, L.T.C., *Design and Construction of Underground Bulkheads and water Barriers*, 1961.
- [10] Kleivan, E., Kummeneje, G., Lyngra, A., Concrete in waterways. In *Concrete in hydropower structures*, pp. 63-69, Norwegian Institute of Technology- Division of Hydraulic Engineering, 1994.
- [11] http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/empreendimento.php?item_id=1, Maio 2013.
- [12] http://www.a-nossa-energia.edp.pt/pdf/nb_baixosabor-albufeira_desenho_02.pdf, Maio 2013.
- [13] Santos, L.L.d., Miranda, A.P.d., *Aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. Projeto e Construção*, 5^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Outubro 2010, pp. 99-108, FEUP.
- [14] http://www.a-nossa-energia.edp.pt/pdf/nb_baixosabor-montante_desenho_01.pdf, Maio 2013.
- [15] http://www.a-nossa-energia.edp.pt/pdf/nb_baixosabor-jusante_desenho_02.pdf, Maio 2013.
- [16] Derivação provisória. In *Aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. Projeto do escalão de montante*, vol. 1 – Tomo A, EDP.
- [17] <http://www.rockscience.com/downloads/phase2/webhelp/phase2.htm>, Maio 2013.
- [18] Oliveira, M.A., Alves, S. *Reforço de potência de Venda Nova III*. Energia elétrica de fontes renováveis, EDP Produção, 2013.
- [19] Venda Nova III. In *Reforço de potência do aproveitamento de Venda Nova – Projeto*, vol. I – Memória geral, EDP, 2009.
- [20] *Planta Geológica-Geotécnica de Venda Nova III*, EDP.
- [21] Desenhos: Circuito hidráulico, central, trecho superior. In *Reforço de potência do aproveitamento de Venda Nova – Venda Nova III*, Empreitada geral de construção – Processo de concurso, EDP, 2009.
- [22] Desenhos: Blindagem. In *Frades II – Fornecimento de equipamentos*, Voith/EDP, 2013.
- [23] Henn, R.W., *Practical guide to grouting of underground structures*, 1996, ASCE Press.

- [24] Desenhos: Circuito hidráulico 4, Restituição, Injeções. In *Aproveitamento hidroelétrico do Douro Internacional – Bemposta*. Reforço de potência – Projeto de execução, EDP, 2010.
- [25] Injeções nos rolhões. In *Venda Nova III-Reforço de Potência, Empreitada Geral de Construção-Processo de Concurso*, pp. 166-172, vol 3- Caderno de encargos- Condições técnicas, EDP, 2009.
- [26] Rolhões- Definição do tipo de injeções, In *Reforço de potência de Venda Nova III – Desenhos do Processo de concurso*, EDP, 2009.
- [27] Topa Gomes, A., 2012 *Apontamentos de obras subterrâneas*. FEUP.
- [28] Dahlo, T.S., Bergh-Christensen, J, Broch, E., *Review of Norwegian high pressure concrete plugs*, Hydropower'92, Broch & Lysne, Rotterdam, 1992.
- [29] Kleivan, E., Kummeneje, G., Lyngra, A., Case 3: Design and construction of a high pressure penstock plug. Nyset-Steggje Power Plant. In *Concrete in hydropower structures*, pp. 114-115, Norwegian Institute of Technology- Division of Hydraulic Engineering, 1994.
- [30] Kleivan, E., Kummeneje, G., Lyngra, A., Case 4: Design and construction of a high pressure gated plug. Mel power plant. In *Concrete in hydropower structures*, pp. 116-118, Norwegian Institute of Technology- Division of Hydraulic Engineering, 1994.
- [31] Kleivan, E., Kummeneje, G., Lyngra, A., Case 5: Design and construction of a high pressure barrier plug. Nedre Vinstra power plant. In *Concrete in hydropower structures*, pp. 119-121, Norwegian Institute of Technology- Division of Hydraulic Engineering, 1994.
- [32] Bohagen, O., *Design and construction of a high pressure concrete plug at the Torpa Hydropower Plant*, Hydropower'92, Broch & Lysne, Rotterdam, 1992.
- [33] Bergh-Christensen, J., *Design of high pressure concrete plugs for hydropower projects*. Rock Mechanics and Power Plants, Romana, Rotterdam, 1988.
- [34] Myrset, O., Lien, R., *High pressure tunnel systems at sima power plant*. ISRM International Symposium, 1982.
- [35] Ilyushin, V.F., Design of concrete plugs in temporary underground hydraulic structures. In *Hydrotechnical construction*, vol. 22, pp 327-334, 1988.
- [36] Edvardsson, S., Broch, E., High pressure tunnels and shafts - Underground powerhouses and high pressure tunnels. In *Hydropower Development*, vol. 14, pp. 84-86, 2002.
- [37] Dimensionamento do rolhão. In *Reforço de potência de Alqueva – Projeto de execução*, COBA/EDP.
- [38] Desenhos: Derivação provisória, Galeria de derivação, Rolhão de obturação definitiva. In *Aproveitamento hidroelétrico de Baixo Sabor – Escalão de montante – Projeto*, EDP, 2005.
- [39] Sousa, R.J.d.C., *Controlo de qualidade na execução de fundações numa barragem – Aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor*, FEUP, 2011.
- [40] Desenhos: Circuito hidráulico – túnel de acesso ao túnel em carga, Escavações, Definição. In *Reforço de potência do aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova – Venda Nova III. Empreitada geral de construção – Projeto de execução*, EDP, 2011.

Anexos

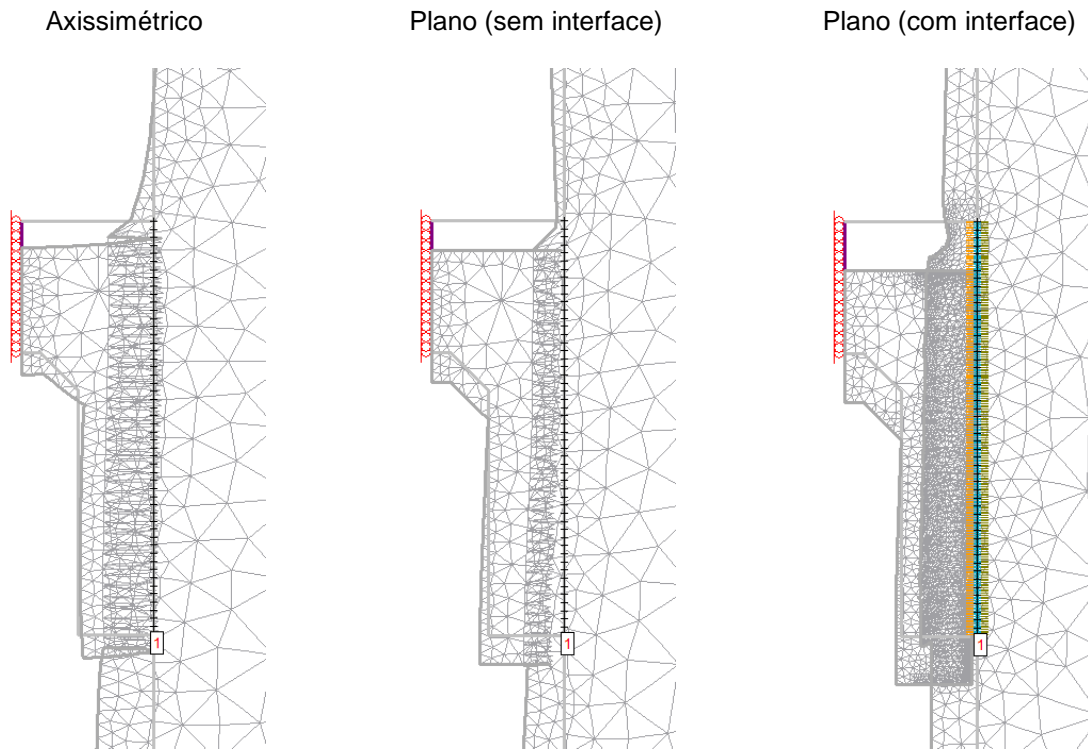
CASO DE ESTUDO 1

The 'Define Material Properties' dialog box is shown for the material 'Maciço'. The 'Name' field is 'Maciço' and the 'Material Colour' is a light blue. The 'Initial Element Loading' is 'Field Stress Only' and the 'Unit Weight (MN/m3)' is '0.027'. Under 'Elastic Properties', the 'Elastic Type' is 'Isotropic'. 'Young's Modulus (MPa)' is '15000' and 'Poisson's Ratio' is '0.3'. The anisotropic properties are all set to 20000 (E1, E2, E3) and 0.2 (ν12, ν13, ν23). Under 'Strength Parameters', the 'Failure Criterion' is 'Mohr Coulomb' and 'Material Type' is 'Plastic'. 'Tensile Strength (MPa)' is '0', 'Dilation Angle (deg)' is '0', 'Fric. Angle (peak) (deg)' is '35', 'Fric. Angle (resid) (deg)' is '35', 'Cohesion (peak) (MPa)' is '0.5', and 'Cohesion (resid) (MPa)' is '0.5'. There are buttons for 'Stage Properties' and 'Datum Dependent'. At the bottom, there are 'Copy To...', 'Show only properties used in model', 'OK', and 'Cancel' buttons.

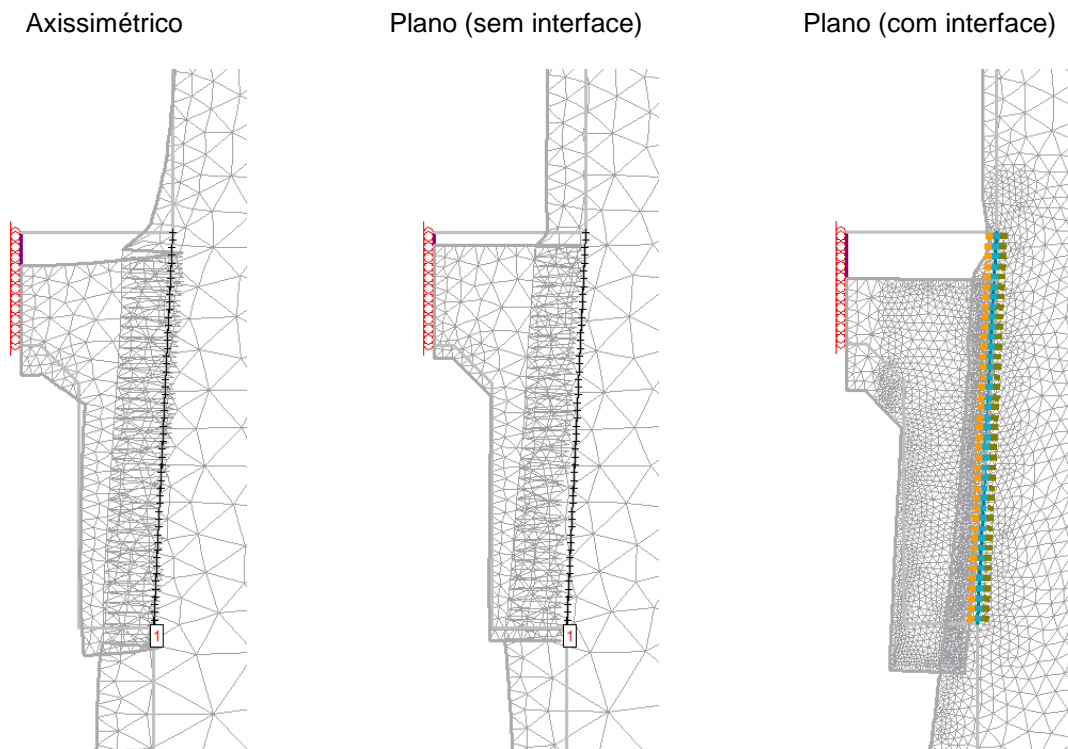
A1.1 Propriedades do maciço.

The 'Define Material Properties' dialog box is shown for the material 'Betão'. The 'Name' field is 'Betão' and the 'Material Colour' is a light green. The 'Initial Element Loading' is 'Field Stress Only' and the 'Unit Weight (MN/m3)' is '0.027'. Under 'Elastic Properties', the 'Elastic Type' is 'Isotropic'. 'Young's Modulus (MPa)' is '30000' and 'Poisson's Ratio' is '0.25'. The anisotropic properties are all set to 20000 (E1, E2, E3) and 0.2 (ν12, ν13, ν23). Under 'Strength Parameters', the 'Failure Criterion' is 'Mohr Coulomb' and 'Material Type' is 'Elastic'. 'Tensile Strength (MPa)' is '0', 'Dilation Angle (deg)' is '0', 'Fric. Angle (peak) (deg)' is '0', 'Fric. Angle (resid) (deg)' is '35', 'Cohesion (peak) (MPa)' is '0', and 'Cohesion (resid) (MPa)' is '10.5'. There are buttons for 'Stage Properties' and 'Datum Dependent'. At the bottom, there are 'Copy To...', 'Show only properties used in model', 'OK', and 'Cancel' buttons.

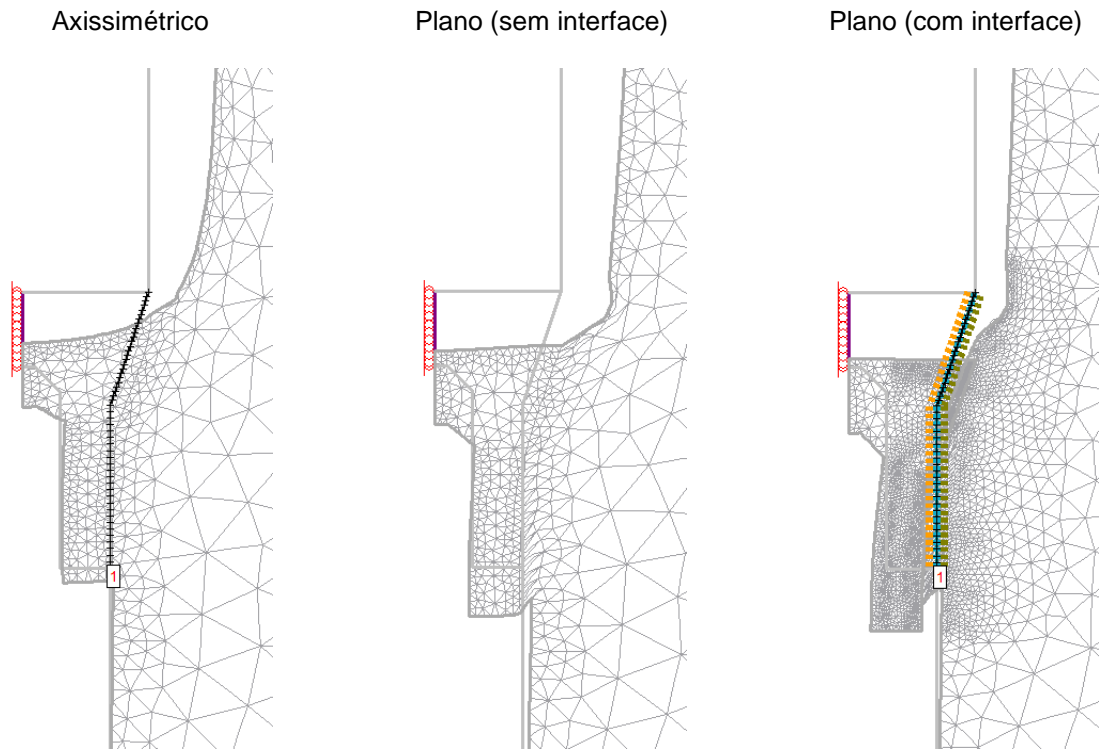
A1.2 Propriedades do betão.



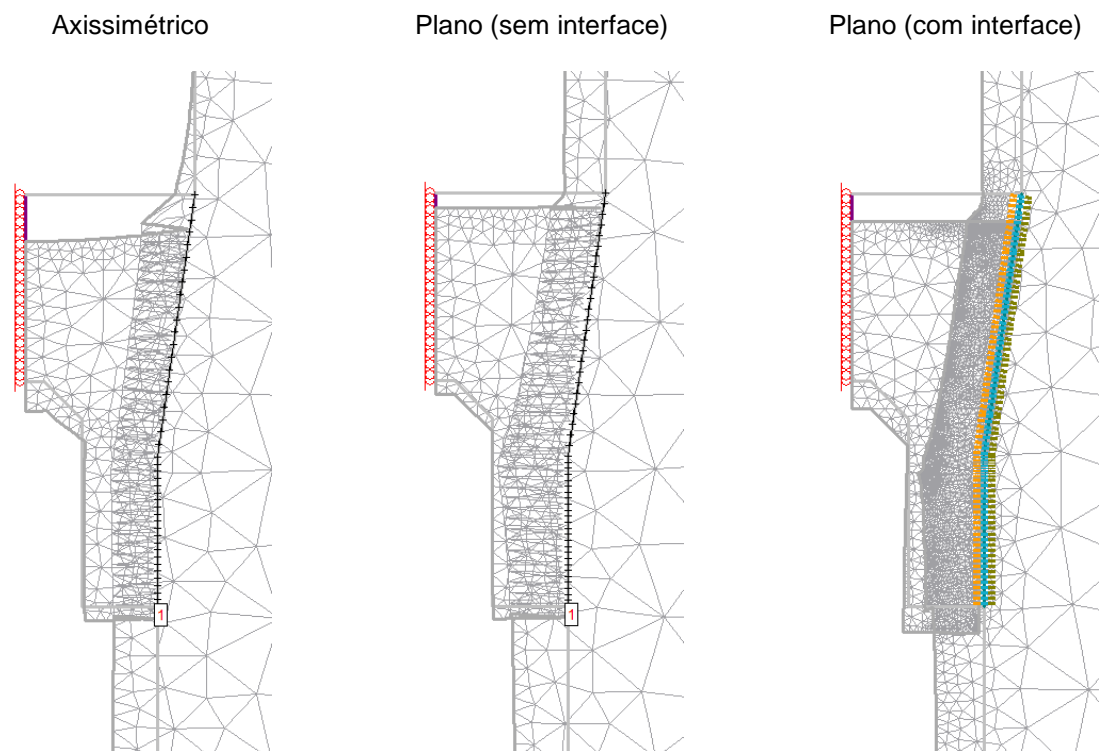
A1.3 Deformada nas três modelações - Cenário 1.



A1.4 Deformada nas três modelações - Cenário 2.

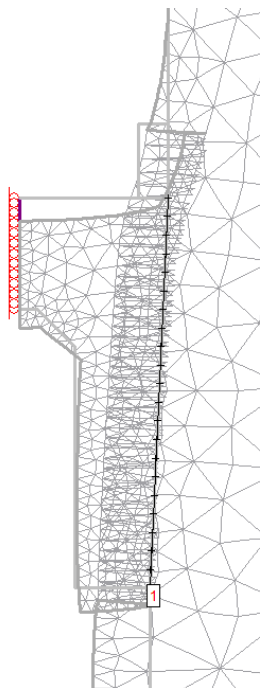


A1.5 Deformada nas três modelações - Cenário 3.

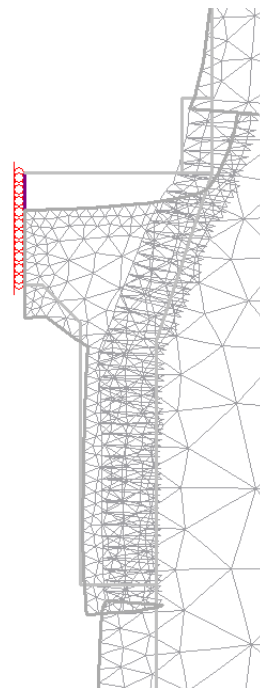


A1.6 Deformada nas três modelações - Cenário 4.

Cenário 2

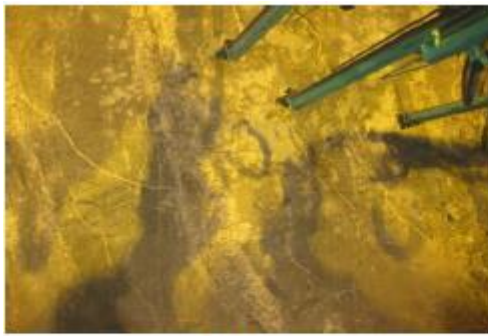


Cenário 3



A1.7 Deformada para os casos com gola a montante.

CASO DE ESTUDO 2



Frente



Abóbada



Hasteal Esquerdo



Hasteal Direito

A 2.3 Registo fotográfico (entre pk 0+228,3 e 0+232).



**REFORÇO DE POTÊNCIA DE VENDA NOVA III
TÚNEL DE ACESSO AO TÚNEL EM CARGA**
Classificação Geotécnica entre pk 0+228,3 e 0+232



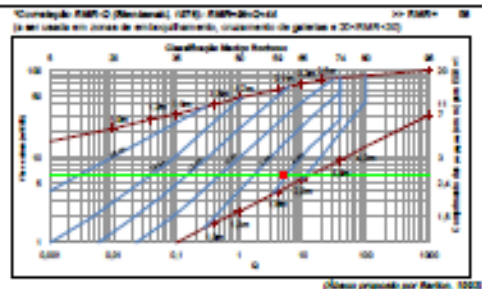
Classificação de Barton	
1. Qualidade da Rocha	RQD
A. Muito pobre	0-5
B. Pobre	5-10
C. Moderado	10-25
D. Bom	25-50
E. Excelente	50-100
J. Se RQD > 10 (percento), o valor adoptado no cálculo de Q é 10	
J. Se RQD > 10 (percento), o valor adoptado no cálculo de Q é 10	
Valor adoptado	
2. Perfil do número de Descontinuidades	Jn
A. Muito (30-40)	0,8 a 1
B. Uma família	1
C. Duas famílias e aleatórias	2
D. Duas famílias	3
E. Duas famílias e aleatórias	4
F. Três famílias	5
G. Três famílias e aleatórias	6
H. Quatro ou mais famílias, muito fraturado	10
I. Rocha compacta, sólida	20
J. Se RQD > 10 (percento), o valor adoptado no cálculo de Q é 10	
Valor adoptado	
3. Perfil da Rugosidade das Descontinuidades	Jr
A. Paredes em contacto	1
B. Paredes em contacto após 10cm de movimento	2
C. Descontinuidades descoladas	3
D. Rugosidade ou irregularidades, isoladas	4
E. Lises, isoladas	5
F. "Stalactites", isoladas	6
G. Rugosidade ou irregularidades, planas	7
H. Lises, planas	8
I. "Stalactites", planas	9
J. Sem contacto de rocha após movimento	10
K. Prescritos agudos e afilados sem contacto entre paredes	11
L. Prescritos arredondados e afilados, sem contacto entre paredes	12
M. Adição 1 ou 2 ao valor de Jn para descontinuidades planas e arredondadas, arredondadas e afiladas, arredondadas e arredondadas	13
Valor adoptado	
4. Perfil da Abertura das Descontinuidades	P
A. Paredes em contacto	1
B. Paredes em contacto após 10cm de movimento	2
C. Descontinuidades descoladas	3
D. Rugosidade ou irregularidades, isoladas	4
E. Lises, isoladas	5
F. "Stalactites", isoladas	6
G. Rugosidade ou irregularidades, planas	7
H. Lises, planas	8
I. "Stalactites", planas	9
J. Sem contacto de rocha após movimento	10
K. Prescritos agudos e afilados sem contacto entre paredes	11
L. Prescritos arredondados e afilados, sem contacto entre paredes	12
M. Adição 1 ou 2 ao valor de Jn para descontinuidades planas e arredondadas, arredondadas e afiladas, arredondadas e arredondadas	13
Valor adoptado	
5. Perfil da Radiação pela Água	Presença (Rpa)
A. Não há radiação (Rpa=0)	0,5
B. Radiação por pressão hidrostática, distribuição normal das pressões	1,0
C. Radiação por pressão hidrostática, distribuição normal das pressões	1,5
D. Radiação por pressão hidrostática, distribuição normal das pressões	2,0
E. Radiação por pressão hidrostática, distribuição normal das pressões	2,5
F. Radiação por pressão hidrostática, distribuição normal das pressões	3,0
G. Radiação por pressão hidrostática, distribuição normal das pressões	3,5
H. Radiação por pressão hidrostática, distribuição normal das pressões	4,0
I. Radiação por pressão hidrostática, distribuição normal das pressões	4,5
J. Radiação por pressão hidrostática, distribuição normal das pressões	5,0
Valor adoptado	
6. Perfil da Radiação pelas Tendões	RTP
A. Zonas de falhas, fraturas, fissuras, etc., com tendência a originar movimentos	10
B. Zonas de falhas, fraturas, fissuras, etc., com tendência a originar movimentos	10
C. Zonas de falhas, fraturas, fissuras, etc., com tendência a originar movimentos	10
D. Zonas de falhas, fraturas, fissuras, etc., com tendência a originar movimentos	10
E. Zonas de falhas, fraturas, fissuras, etc., com tendência a originar movimentos	10
F. Zonas de falhas, fraturas, fissuras, etc., com tendência a originar movimentos	10
G. Zonas de falhas, fraturas, fissuras, etc., com tendência a originar movimentos	10
H. Zonas de falhas, fraturas, fissuras, etc., com tendência a originar movimentos	10
I. Zonas de falhas, fraturas, fissuras, etc., com tendência a originar movimentos	10
J. Zonas de falhas, fraturas, fissuras, etc., com tendência a originar movimentos	10
Valor adoptado	

Classificação de Bieniawski	
1. Comprimento e Espessura das Descontinuidades	
Comprimento (m)	<1 1-3 3-10 10-20 20-100 >100
Espessura (mm)	<0,1 0,1-0,2 0,2-0,5 0,5-1 1-2 >2
Valor	0 1 2 3 4 5
Valor adoptado	
2. RQD	
RQD (%)	<25 25-50 50-75 75-90 90-100
Valor	0 1 2 3 4
Valor adoptado	
3. Perfil das Descontinuidades	
Comprimento (m)	<1 1-3 3-10 10-20 20-100 >100
Valor	0 1 2 3 4 5
Valor adoptado	
4. Perfil das Descontinuidades	
Comprimento (m)	<1 1-3 3-10 10-20 20-100 >100
Valor	0 1 2 3 4 5
Valor adoptado	
5. Perfil das Descontinuidades	
Comprimento (m)	<1 1-3 3-10 10-20 20-100 >100
Valor	0 1 2 3 4 5
Valor adoptado	
6. Perfil das Descontinuidades	
Comprimento (m)	<1 1-3 3-10 10-20 20-100 >100
Valor	0 1 2 3 4 5
Valor adoptado	

RMR = RQD + RQD + ESPESURA + CARACTERÍSTICAS + ÁGUA + CORREÇÃO

RMR	78	ARÇAO TPC
Q = (RMR / Jn) x (Jr / Jp) x (Jw / RPF)		A
Q	5,00	

Características das Rochas	
Qualidade da Rocha	100-80 80-60 60-40 40-20 <20
Classe RMR	I II III IV V
Descrição da Rocha	Muito Bom Bom Moderado Pobre Muito Pobre
Condição da Rocha	>100 100-80 80-60 60-40 40-20 <20
Ângulo de atrito	>30° 30°-25° 25°-20° 20°-15° 15°-10° <10°
Valor do ângulo	100 80 60 40 20 10
Valor do ângulo	100 80 60 40 20 10



Data: 20/01/2011
Elaborado por: Patrícia Mateus
Validado por: (Assinatura)

A 2.4 Classificação Geotécnica entre o pk 0+228,3 e 0+232.